



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

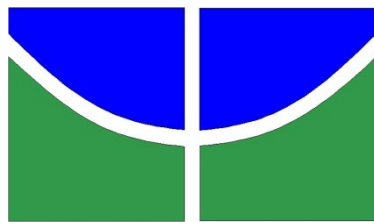
**ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM
TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE
RETARDANTES DE CHAMAS DE CURTA DURAÇÃO NOS
INCÊNDIOS FLORESTAIS**

Léo de Lacerda

Brasília, 15 de dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



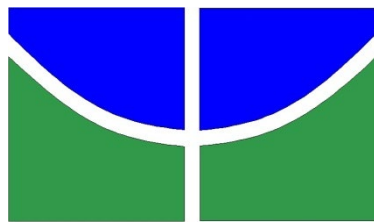
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

**ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM
TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE
RETARDANTES DE CHAMAS DE CURTA DURAÇÃO NOS
INCÊNDIOS FLORESTAIS**

Léo de Lacerda

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação
apresentado ao Departamento de Engenharia
Florestal da Universidade de Brasília como parte
das exigências para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Florestal.
Orientador: Prof. Dr. Carlos Henke de Oliveira

Brasília-DF, 15 de dezembro de 2023



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Tecnologia - FT
Departamento de Engenharia Florestal – EFL**

**ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM
TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE
RETARDANTES DE CHAMAS DE CURTA DURAÇÃO NOS
INCÊNDIOS FLORESTAIS**

Estudante: Léo de Lacerda

Matrícula: 15/0135408

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henke de Oliveira

Menção: _____

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henke de Oliveira
Universidade de Brasília – UnB
Departamento de Ecologia
Orientador (ECL)

Prof. Dr. Eraldo Trondolli Matricardi
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira
Universidade de Brasília – UnB
Membro da Banca

Brasília-DF, 15 de dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

LACERDA, LÉO DE

ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES DE CHAMAS DE CURTA DURAÇÃO EM INCÊNDIOS FLORESTAIS.

49 p., 210 x 297mm (EFL/FT/UnB, Engenheiro(a), Engenharia Florestal, 2023).

Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

1. Incêndios Florestais

2. Retardantes de Chamas

3. Combate químico

I. EFL/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LACERDA, L. (2023). **ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES DE CURTA DURAÇÃO EM INCÊNDIOS FLORESTAIS**. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Léo de Lacerda

TÍTULO: *Abordagem metodológica baseada em termogravimetria voltada ao estudo da eficiência de retardantes de chamas de curta duração em incêndios florestais*

GRAU: Engenheiro Florestal

ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Léo de Lacerda

lacerda.l@yandex.com

Essa monografia é dedicada a todos que auxiliaram de algum modo nesse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Margarida Antônia de Lacerda, por toda a paciência e incentivos a mim dedicados, à minha namorada Gabriella Barbosa da Silva por todo apoio nas horas mais difíceis dessa jornada, ao professor Carlos Henke de Oliveira pelas longas conversas sobre ecologia, tecnologia e arte.

Recordo aqui o papel central da Universidade de Brasília, em especial do Departamento de Engenharia Florestal e do Instituto de Ciências Biológicas por terem me fornecido o ensino que utilizei para desenvolver este trabalho.

Faço questão de mencionar duas colegas de pesquisa que colaboraram fortemente na parte prática desta pesquisa: Lara Beatriz de Miranda Belmonte e Mariana Ribeiro do Prado, ambas graduandas em Biologia.

Gostaria de lembrar o papel dos professores Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi e Reginaldo Sérgio Pereira pelas contribuições ao longo da minha graduação, recordar dos colegas presentes e passados que levaram à frente o projeto Prometeu.

Fico grato também a todas as demais pessoas que auxiliaram de alguma maneira na realização desta monografia.

*“A partir de certo ponto não há mais retorno.
Esse é o ponto que deve ser alcançado”.*
(Franz Kafka)

RESUMO

Lacerda, Léo de (LACERDA, L.) **ABORDAGEM METODOLÓGICA BASEADA EM TERMOGRAVIMETRIA VOLTADA AO ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE RETARDANTES DE CHAMAS DE CURTA DURAÇÃO EM INCÊNDIOS FLORESTAIS**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

Os retardantes de chamas podem trazer melhores perspectivas para o combate a incêndios florestais e o Brasil não possui normatização legal a respeito dessa tecnologia, assim esse trabalho de conclusão de curso, inserido no projeto Prometeu, descreve experimentos e metodologias para facilitar a análise do desempenho desses produtos químicos no retardo de chamas. Os experimentos foram conduzidos em escala de pátio, que é um intermediário entre os testes de laboratório e os de campo, no Dispositivo Termogravimétrico (DTG) Osíris. O tipo de retardante pesquisado é o Retardante de Curta Duração, RCD, que permanece ativo retardando as chamas por aproximadamente uma hora após sua aplicação. Foram feitos testes de eficiência de um RCD denominado Romeo (codinome), submetido a sucessivas queimas à concentração de 0,06 % no DTG Osíris, além do estudo sobre a oscilação de massa do combustível florestal, basicamente capim seco, em função da variação de umidade atmosférica ao longo de onze dias nesse mesmo dispositivo. Esses experimentos foram analisados por um modelo gravimétrico, chamado Modelo Gravimétrico de Cinética de Perda de Massa (Mog-CPM), e por um modelo termal, denominado Modelo Termal Hórus. O Mog-CPM modelou matematicamente dados de massa inicial e final, tempo e extensão das queimas para estimar os parâmetros K e c, indicadores indiretos de inflamabilidade e velocidade de queima respectivamente. O modelo Hórus processou os dados de temperatura e gerou arquivos de vídeo mostrando a queima com a linha da frente de avanço do fogo, suas médias de temperatura associadas a um gradiente de cores e na forma numérica em uma mesma interface. As respostas de cada modelo foram primeiro comparadas entre si, seus parâmetros foram ajustados, só então a eficiência do retardante foi finalmente avaliada. Os resultados não indicaram eficiência no combate às chamas para o retardante Romeo nos critérios de Massa final pós-queima, Velocidade da frente de avanço do fogo e Temperatura de queima. O ajuste dos parâmetros K e c não foi conclusivo em comparação com os dados obtidos nas queimas experimentais. O modelo Hórus agregou as métricas das queimas e gerou uma interface apropriada para pesquisa sobre eficiência de retardante de chamas.

Palavras-chave: Incêndios florestais; Retardantes de chamas; Combate químico.

ABSTRACT

Lacerda, Léo de (LACERDA, L.) **METHODOLOGICAL APPROACH BASED ON THERMOGRAVIMETRY AIMED AT STUDYING THE EFFICIENCY OF SHORT-TERM FIRE RETARDANTS IN FOREST FIRES**. Monograph (Forest Engineering Degree) – University of Brasília, Brasília, DF.

Flame retardants can bring better prospects for fighting forest fires and Brazil does not have legal regulations regarding this technology, so this course conclusion work, inserted in the Prometheus Project, describes experiments and methodologies to facilitate the analysis of the performance of these chemicals in flame retardancy. The experiments were conducted at the yard scale, which is an intermediate between laboratory and field tests, on the Osiris thermogravimetric device (DTG). The type of retardant researched is the short-lived retardant, RCD, which remains active by delaying flames for approximately one hour after its application. Efficiency tests were performed on a CDR called Romeo (code name), subjected to successive burns at a concentration of 0.06% in DTG Osiris, in addition to the study on the mass oscillation of forest fuel, basically dry grass, as a function of atmospheric humidity variation over eleven days in the same device. These experiments were analyzed by a gravimetric model, called the gravimetric mass loss Kinetics model (Mog-CPM), and by a thermal model, called The Horus Thermal Model. The Mog-CPM mathematically modeled initial and final Mass Data, time and extent of burns to estimate the parameters K and c, indirect indicators of flammability and burning speed respectively. The Horus model processed the temperature data and generated video files showing the burning with the front line of advance of the fire, its temperature averages associated with a color gradient and in numerical form on the same interface. The responses of each model were first compared with each other, their parameters were adjusted, only then the efficiency of the retardant was finally evaluated. The results did not indicate flame-fighting efficiency for Romeo retardant in the criteria of final post-burning mass, fire advance front speed and burning temperature. The adjustment of the parameters K and c was not conclusive compared to the data obtained in the experimental burns. The Horus model aggregated burn metrics and generated an appropriate interface for flame retardant efficiency research.

Keywords: Forest fires; Fire retardants; Chemical fighting.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** A Osiris 1.07 consiste num dispositivo termogravimétrico (DTG) construído no âmbito do Projeto Prometeu e inaugurado em setembro de 2022. Em (a) tem-se a visualização geral do Osiris e b) mostra o módulo de processamento de dados (Braga, 2022)..... 18
- Figura 2.** Localização da Área Alfa da Marinha do Brasil, de onde foi tirado parte do material vegetal para gerar combustível em queimas laboratoriais..... 19
- Figura 3.** Aspecto fisionômico da maior parte da vegetação utilizada como combustível nos experimentos laboratoriais. A predominância de estrato herbáceo com predominância de gramíneas nativas fornece um combustível relativamente fino e a baixa densidade de arbustos e árvores implica numa baixa fração de serapilheira composta por dicotiledôneas..... 20
- Figura 4.** Material selecionado, separado em sacos de tela de sombreamento, secando ao sol em um pátio do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília..... 21
- Figura 5.** Retardante sendo pesado..... 22
- Figura 6.** Fluxograma geral do funcionamento da queima experimental com o DTG Osiris, portando 17 passos essenciais para a realização das queimas. Trata-se de um processo cíclico, o início é quando o Osiris está aberto, sem carenagem, sem cinza nos leitos, isto é, limpos com o soprador. 24
- Figura 7.** Sacos com capim, soprador, extintor de incêndio, bomba costal. 25
- Figura 8.** Material de ignição para iniciar as queimas, da esquerda para a direita: cordões embebidos em gasolina, tochas, galão de gasolina e cordões secos. Esses componentes foram mantidos, por medidas de segurança, afastados do combustível florestal na preparação das queimas..... 26
- Figura 9.** Bandeja com retardante (de baixo) e com água (de cima), ambos com aproximadamente 20 cm de largura. Os estopins não receberam água nem solução com retardante, o cordão embebido em álcool e gasolina ficou com três pontas para fora de modo a receber facilmente o calor da tocha acesa e iniciar a queima ao mesmo tempo com a mesma intensidade para os dois tratamentos. 27
- Figura 10.** Fotografias obtidas durante a combustão na Osiris, mostrando: **a)** o estágio anterior à chegada da frente de fogo atingir a extremidade oposta do leito e; **b)** o estágio após atingir esse marco. 28
- Figura 11.** Legenda explicativa da representação Hórus da Osiris 1.07, com estatísticas para ambos os leitos (esquerda e direita). As linhas vermelhas indicam a posição instantânea de

frente de fogo e as linhas pretas mostram as isolinhas de maior temperatura. Dados de temperaturas (mínima, máxima, média instantâneas são mostradas nos números brancos). Neste exemplo, a imagem mostra o frame número 53 (de um total de 264), equivalente a 164 segundos após o início do registro. No leito da esquerda, a ignição foi detectada entre o frame 2 e 3 (durando 3 segundos), a corrida da frente de fogo esteve entre os frames 3 e 53, durando 155 segundos, e as temperaturas indicaram queima remanescente por 797 segundos, com temperatura média de 177°C e velocidade da frente de 0,008 m/s. Para o leito da direita, estas estatísticas são mostradas no seu local correspondentes.32

Figura 12. Exemplo de dado bruto oriundo das células de carga, que indicam o valor de massa (gramas) de material remanescente. Deve-se observar que a massa inicial de combustível é 1500 g, que difere dos valores do gráfico (aprox. 1800 gramas). Isso se deve ao fato de que a adição de 500 ml de retardante (e de água) implica a adição de 500 gramas em cada leito, o qual tende a reduzir em função da evaporação entre o ato da adição do líquido e o início da queima. Tais dados foram incorporados nos cálculos, visando analisar a cinética de perda de massa em percentual e não em valor absoluto de massa.34

Figura 13. Cinética de perda de massa (%) nas seis réplicas. Ao topo de cada gráfico mostra-se a data e horário de início da queima, bem como a réplica (R1 a R6). As séries temporais de água e retardante (R0.06 – Romeo a 0.06%) são descritas graficamente (curvas) e por meio dos parâmetros do modelo MoG-CPM (m_0 = massa inicial, m_f = massa final, E = eficiência de combustão), c = indicativo de velocidade e K = indicativo de inflamabilidade), bem como a redução em cada um desses fatores ao comparar o tratamento (R0.06) ao controle (água).35

Figura 14. Massas residuais (M_f) do tratamento com água e com o Romeo36

Figura 15. Comparação entre os componentes K obtidos nos tratamentos Água e Romeo. O ‘ K ’ na Água foi maior nas réplicas 2, 3, 4 e 5 e menor nas réplicas 1 e 6.37

Figura 16. Interfaces do modelo Hórus, sendo: o leito esquerdo o Romeo e o direito, a água; Frente de avanço do fogo (°C), em vermelho; Linha da máxima temperatura (°C), em preto; Temperatura média de toda a queima (°C), em amarelo, no topo (entre parênteses estão o mínimo e o máximo); Abaixo desta, a Temperatura média do estágio de corrida (°C), em preto, com máximo em parênteses; Abaixo desta, a Velocidade média da frente de avanço do fogo ($m.s^{-1}$), em preto; embaixo na figura, o Tempo do estágio de corrida (s), em preto; abaixo desta, o Tempo de toda a queima (s), em amarelo.39

Figura 17. Velocidade do fogo com água e o outro composto de retardante ao longo das seis réplicas, usando o imageamento do *software* Hórus.40

Figura 18. Ensaio de absorção e perda de água. Umidade do combustível e umidade relativa do ar durante o ensaio de secagem após a adição de água (ou retardante) e a o efeito da umidade do ar sobre o ganho e perda de água no combustível.....	42
Figura 19. Determinação entre umidade relativa e perda de peso ao longo do tempo.....	43
Figura 20. Texturas distintas dos combustíveis em cada tratamento. O tratamento Água preservou melhor a estrutura vegetal do combustível, ao passo em que o tratamento Romeo teve seus componentes foliares esmigalhados por conta da intensa manipulação para o espalhamento do retardante.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Expressões matemáticas do MoG-CPM. Cada expressão se ajusta a uma determinada fase, a depender de posição da frente de fogo já ter atingido o final do leito ou não.	28
Tabela 2. Fórmulas de Massa Relativa Consumida (%), Redução de: Massa relativa consumida (%); Indicações de velocidade (%) e de intensidade (%).	30
Tabela 3. Cronograma de queimas realizadas, em horário local (Brasília) e duração.	33
Tabela 4. Condições meteorológicas médias durante as queimas	33
Tabela 5. Médias de: Massa Final (Mf), Massa relativa consumida (E) e Indicativo de inflamabilidade (K).	37
Tabela 6. Médias de: Temperatura total, em ambos estágios da queima; Temperatura na corrida, apenas no primeiro estágio da queima; Velocidade do fogo, medida apenas no primeiro estágio da queima.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPM	Cinética de Perda de Massa
DTG	Dispositivo Termogravimétrico
EIA	Estudo de impacto ambiental
FAF	Frente de Avanço do Fogo
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Prevfogo	Centro Nacional de Prevenção e Combate a Incêndios Florestais
ICMBio	Instituto Chico Mendes da Conservação da Biodiversidade
LGE	Líquido Gerador de Espuma
MMA	Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima
RCD	Retardante de Curta Duração
RIMA	Relatório de Impacto ambiental
RLD	Retardante de Longa duração
TG	Termogravimetria
UFMS	Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
UFPR	Universidade Federal do Paraná

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Incêndios florestais	13
3.2	Combate a incêndios florestais.....	14
3.3	Retardantes de incêndio.....	15
3.4	Termogravimetria	16
4	MATERIAIS E MÉTODOS	17
4.1	O Dispositivo Termogravimétrico Osiris	17
3.2	O capim usado como combustível.....	18
4.2	O retardante Romeo e a preparação do combustível.....	21
4.3	O planejamento das queimas.....	23
4.4	Modelo Gravimétrico para Cinética de Perda de Massa (MoG-CPM).....	28
4.5	Estudo da umidade no combustível florestal usando o DTG Osiris	30
4.6	Modelo Termal Hórus.....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1	Resultados	32
5.2	Discussão geral.....	43
6	CONCLUSÕES.....	47
7	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O retardante de chamas consiste no suporte químico empregado em combate a incêndios, estruturais ou florestais, e tem por objetivo retardar a velocidade de propagação e diminuir a emissão de calor das chamas para que o combate direto venha a debelar o incêndio de vez. A denominação combate químico também se aplica mesmo quando o efeito fornecido pelo retardante pode ser predominantemente físico, a exemplo dos líquidos geradores de espuma, os LGEs, empregados para criar uma barreira espumosa entre o fogo e os fatores combustível e comburente com vistas a amainar o incêndio (BRAGA, 2022).

No Brasil não é proibido o uso de retardantes de chamas em incêndios florestais, tampouco há normas técnicas e legislação que regulem seu uso, assim há certo impasse na utilização dessa tecnologia. Um agravante para esta situação são os impactos ambientais do uso dos retardantes, que não foram cientificamente dimensionados, entre os quais está a possibilidade de poluição, principalmente dos recursos hídricos. Uma vez que a poluição é tipificada como crime ambiental (BRASIL, 1998), com agravante de pena quando cometido em áreas unidades de conservação, o uso de retardantes de chamas em incêndios florestais é temerário do ponto de vista judicial

Do ponto de vista econômico existe uma janela de oportunidade para a venda de retardantes de chamas no Brasil, o que desperta o interesse dos fabricantes de repetir aqui o que se dá em países como os EUA, (BATISTA, 2009) em que o uso massivo, na escala de milhões de litros por ano, é prática corrente no combate a incêndios, com consideráveis retornos financeiros.

Fogo representa simplesmente o fenômeno em si de combustão com desprendimento de calor e chamas visíveis, enquanto o incêndio florestal é o fogo descontrolado em vegetação nativa ou antropizada (JACOBS, 2021), causador de prejuízos sociais, naturais e econômicos. Com base nessa diferenciação e com uma perspectiva socioambiental mais ampla é que se insere o projeto Prometeu, iniciativa extensionista e acadêmica com foco em estudos sobre combate a incêndios sob o prisma socioeconômico, ambiental e político, com o objetivo central de avaliar os impactos positivos (eficiência) e negativos (danos à socio-biodiversidade) gerados no combate químico. Entende-se aqui a importância de conjugar as diversas instituições parceiras para lidar com as novidades tecnológicas, a exemplo dos retardantes químicos, de maneira consciente, na base de experimentação científica qualificada

e respondendo às perguntas-demandas advindas da comunidade externa à academia, como Associações de Moradores, povos indígenas, corporações de brigadistas florestais.

O presente trabalho é contextualizado no Projeto Prometeu, com coordenação na Universidade de Brasília, que aborda o combate aos incêndios florestais e tem foco em pesquisa, divulgação e interação com a comunidade. Os parceiros são Prevfogo/Ibama, ICMBio, Corpo de Bombeiros Militar do DF, UFPR e UFMS.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar a medição da eficiência de retardante de chamas e à mensuração de grandezas ligadas ao material combustível amostrado nas queimas experimentais através do dispositivo termogravimétrico (DTG) Osiris (atualmente na versão 1.07).

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a eficiência do retardante de curta duração (RCD) Romeo mediante combustão monitorada pelo sistema Osiris;
- Entender como a presença/ausência do RCD afeta a variação da umidade e, conseqüentemente, da massa no material combustível em função da variação da umidade atmosférica.
- Propor a adoção de um modelo matemáticos e um modelo gráfico, voltado ao entendimento sobre o processo de retardo de chamas.
- Testar a praticidade do RCD Romeo em sua solubilização, manejo e aplicação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Incêndios florestais

Entende-se por incêndio florestal (SILVA *et al.*, 2022) a situação em que o fogo se alastra por vegetação, plantada ou nativa, de forma descontrolada, advinda de causas naturais ou por ação humana, com diversas externalidades negativas geradas em sua passagem, desde destruição de habitats a perdas econômicas e desestruturação social.

No caso do Brasil existe um histórico bastante preocupante quanto à ocorrência e extensão de incêndios florestais nos últimos anos, com uma média de 327 922 km² que abarca o intervalo de 2003 a 2022 (INPE, [s.d.]). Tal situação fica mais delicada ao analisar as perspectivas de mudanças climáticas no mundo e, de um ponto de vista regional, a redução da precipitação média anual e da vazão das bacias hidrográficas (CAMPOS; CHAVES, 2019) que abastecem a população do Distrito Federal, pois essas perspectivas devem ser levadas em consideração quando se pensa em incêndios florestais e como manejar novas tecnologias para combatê-los.

O conhecimento a respeito dos incêndios florestais é de suma importância, tanto para cientistas que trabalham com a ecologia do fogo, especialmente em biomas frequentemente atingidos por ele, a exemplo das savanas, quanto para bombeiros, brigadistas e demais combatentes de incêndio florestal. Para esses últimos, estar a par dos padrões de aparecimento e evolução dos incêndios influi bastante sobre o treinamento das brigadas, escolha de táticas e estratégias mais adequadas e escolha dos meios de combate (químicos, físicos, mecânicos) para cada situação (LIMA *et al.*, 2020).

Correlata ao estudo sobre incêndios florestais existe a pesquisa sobre os combustíveis vegetais, com tentativas de quantificar o fenômeno da combustão desses materiais a partir de índices. Nesse sentido (ANDERSON, 1970) desenvolveu três índices básicos: inflamabilidade, como tendência própria do material a entrar em combustão; sustentabilidade, como capacidade do material manter a queima após a retirada da fonte de ignição; e combustibilidade, como rapidez do material em queimar-se.

Ao lidar com combustível florestal típico do Cerrado brasileiro, outro índice foi tido em consideração: a consumabilidade, entendida como a porção do combustível que foi de fato queimada (SOUZA; VALE, 2019). Tal métrica é apropriada a incêndios florestais no bioma

Cerrado, que atingem desde campos abertos a cerradões em um mesmo episódio, consumindo proporções diferentes de material queimado.

3.2 Combate a incêndios florestais

O enfrentamento aos incêndios florestais se dá com a prevenção e o combate. A prevenção consiste em reduzir a probabilidade de ocorrência de incêndios, já o combate visa extinguir o incêndio já em andamento (BATISTA, 2018). Para o combate costuma-se fazer a divisão entre combate direto e indireto.

Combate direto dá-se quando as ferramentas de supressão ou retardo de incêndio são aplicadas diretamente na linha de fogo ou na sua margem imediata (LEMOS *et al.*, 2010). Os chamados supressores ou retardantes podem ser água (com ou sem retardantes químicos), abafadores, terra. Os líquidos são lançados por bombas costais ou mangueiras bombeadas hidráulicamente através do veículo de combate a incêndios florestais, o chamado Auto Bomba Tanque Florestal (ABTF).

O combate indireto consiste em atuar afastado da linha de fogo, mas de modo a cortar propagação das chamas ao inutilizar o combustível vegetal em solo que seria consumido no decorrer do incêndio. Tal operação pode ser feita com o uso de contrafogo (LEMOS *et al.*, 2010) ou aceiros, sendo que estes podem ser do tipo negro (queima de uma faixa de terreno suficientemente larga a ponto de impedir o avanço das chamas), ou do tipo químico (Braga, 2022), especialmente com uso de retardantes de longa duração.

É preciso considerar que as próprias atividades de combate a incêndios florestais geram impactos ambientais, positivos e negativos, cuja discussão deve ser bem qualificada para gerar um balanço realista e apropriado para cada realidade (BACKER; JENSEN; MCPHERSON, 2004). Tal pensamento também inspirou o projeto Prometeu, que se debruça sobre o complexo jogo de impactos positivos e negativos da interrelação incêndio florestal – combate.

A análise do conteúdo químico e energético do combustível vegetal é uma ferramenta imprescindível para montar estratégias de gestão dos incêndios florestais, com alternativas como os aceiros verdes a partir de espécies nativas do cerrado (SOUZA; VALE, 2019).

3.3 Retardantes de incêndio

As sociedades há milênios tentam desenvolver soluções químicas para ajudar a combater incêndios, mas o desenvolvimento mais recente produtos polimerizados serviu de estímulo para maiores avanços tecnológicos na elaboração química de novos retardantes (JACOBS, 2021).

Como a gama destes produtos é bem ampla, é necessário organizá-los em classes, e o uma sistemática bem difundida faz uma divisão principal entre retardantes de longa duração e de curta duração, de acordo com o tempo de atuação em que esses químicos ficam ativos para combate ao fogo (PASTOR, 2004).

Os de longa duração trabalham com a perspectiva de agir mesmo após o solvente em que se encontra, a água, evaporar e seu princípio ativo, em geral um tipo de sal, ficar mais concentrado em contato com o combustível, realizando, por alguma interação química, processos que inibam a pirólise, retirando a combustibilidade do material em que o retardante foi espalhado (FILHO *et al.*, 2012).

Os retardantes de curta duração têm um período médio de atuação de até uma hora após sua aplicação (PASTOR, 2004), e grande parte de seu mecanismo de atuação está relacionado com a manutenção do teor de umidade no combustível florestal, fazendo com que este continue úmido por um tempo mais prolongado ao longo do incêndio, de forma que a energia liberada pela queima seja desviada para a evaporação da água que se encontra naquele sistema e diminua a temperatura geral do mesmo (VIEIRA *et al.*, 2011)

Como o retardante é de curta duração, infere-se (BATISTA, 2018) que sua atuação advenha da interação deste com a água, retendo-a por mais tempo no material vegetal pelo qual o Romeu foi espalhado, fazendo com que parte do calor dispendido pelas chamas seja desviado para evaporar a solução hídrica lançada ao combustível. Há ainda a subdivisão destes em espumógenos, mais conhecidos como líquidos geradores de espuma ou LGEs, e os géis, também chamados viscosantes, exemplificados pelo retardante Romeu aqui estudado. Os LGEs produzem uma barreira física de consistência espumosa de modo a bloquear a reação em cadeia do fogo, já os gelificantes formam uma calda espessa que adere à superfície do combustível impregnando-a por mais tempo com um teor maior de umidade, o que dificulta a queima do material (PASTOR, 2004). Os géis interagem com a água ao absorver grandes quantidades desta, o que gera uma mistura viscosa, capaz de aderir por mais tempo ao

combustível florestal e retirar calor que seria direcionado à reação em cadeia do fogo (PLUCISNKI; SULLIVAN; HURLEY, 2017).

Em termos econômicos os retardantes de chamas são mercadorias de alto valor agregado, por se tratar de produtos químicos sintetizados a partir de elementos como antimônio, boro, bromo e outros elementos químicos de sofisticado refino. No Brasil, apesar de não haver comercialização em massa desses produtos para combate a incêndios florestais, em 2021 uma licitação para compra de 10000 litros de retardantes de chamas pelo valor de R\$525.500,00 foi aberta (e revogada logo em seguida), resultando em um custo médio de R\$52,55 por litro (MENEGASSI, 2021).

3.4 Termogravimetria

A termogravimetria (TG) é uma abordagem oriunda da química analítica ligada às análises térmicas. Na TG observa-se a alteração da massa do material estudado em função da variação de temperatura em ambiente controlado. Essa técnica é empregada na química, engenharia de materiais, mineralogia e para a engenharia florestal o foco geralmente é a degradação térmica de madeiras. Entende-se que o processo de redução da massa do corpo submetido a aquecimento advém basicamente de perda de líquidos, desidratação no caso da água, evaporação, sublimação (PEREIRA *et al.*, 2009).

Ainda no setor florestal é corrente exemplares de madeiras serem aquecidos em ambiente não oxidante, sem disponibilidade de O₂, para mensurar a degradação de seus componentes moleculares conforme a temperatura eleva-se (PEREIRA *et al.*, 2013). Para tal existe maquinário específico, contudo de tamanho limitado, permitindo apenas teste com pequenas amostras de poucos gramas de massa cada, pouco estudo existe, portanto, para com superfícies mais amplas e de combustíveis com geometrias mais complexas, irregulares, emulando pastagens e campos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 O Dispositivo Termogravimétrico Osiris

Do ponto de vista mecânico, o DTG Osiris compreende uma estrutura metálica aproximadamente cúbica, com as 12 arestas básicas de um cubo além de mais duas verticais para o reforço estrutural, na parte de baixo localizam-se duas bandejas removíveis, chamadas de leitos, de tela-moeda, forradas com lã de rocha projetadas para receber até 20 quilogramas de combustível (**Figura 1 a**). O Osiris sustenta-se sobre quatro rodinhas giratórias (rodízios), que lhe garantem mobilidade, de modo a ser transportado para diversos ambientes, com condições de temperatura, vento, umidade e luminosidade distintas. Por essa característica é possível manobrar o Osiris de acordo com a direção do vento, inclinação do terreno ou outra condição desejada. Outra característica desse mecanismo é poder canalizar o vento em algum sentido ou barrá-lo completamente utilizando placas laterais removíveis, na chamada carenagem do DTG.

Pelo viés elétrico e eletrônico trata-se de um sistema embarcado composto de uma estação meteorológica, sensor termal interno, câmara termal e células de carga que medem o peso do combustível e sua variação ao longo do tempo. Os sensores meteorológicos, termais e gravimétricos são conectados por cabo a um módulo de *hardware* destacável (**Figura 1 b**), cuja função é armazenar dados e realizar certos processamentos computacionais mais básicos. O *software* do DTG Osiris utilizado nesse experimento é a versão 1.07.

O DTG Osiris já realizou 45 queimas experimentais desde sua construção, sendo 57,8% delas feitas com retardantes de longa duração e as demais 42,2% com retardantes de curta duração. O sistema mostrou-se capaz, portanto, de trabalhar com essas duas realidades em uma mesma plataforma.

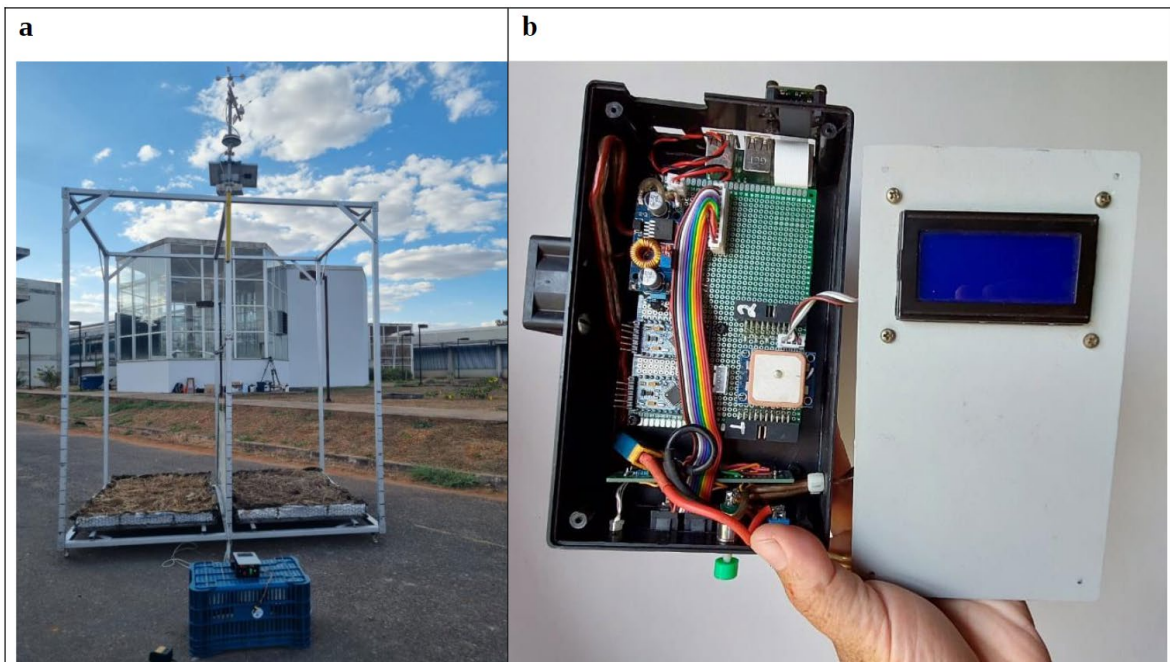


Figura 1. A Osiris 1.07 consiste num dispositivo termogravimétrico (DTG) construído no âmbito do Projeto Prometeu e inaugurado em setembro de 2022. Em (a) tem-se a visualização geral do Osiris e b) mostra o módulo de processamento de dados (Braga, 2022).

3.2 O capim usado como combustível

O capim utilizado como combustível foi obtido de pastagens naturais e antropizadas de lugares diferentes do Distrito Federal, desde as predominantemente nativas da Estação Rádio Marinha em Brasília, situada no interior da Área Alfa da Marinha (**Figura 2**), até as comuns na alimentação de gado, estas últimas colhidas nas cercanias da UnB. A constituição desses materiais variou, de modo que os provenientes de áreas mais preservadas (**Figura 3**) contêm maior teor de pequenos galhos de lenhosas, raques de certas palmeiras e folhas de dicotiledôneas, perfazendo um conteúdo mais grosso em sua granulação, enquanto o que vem de regiões mais antropizadas são basicamente folhas e estruturas reprodutivas de gramíneas, de granulometria fina.

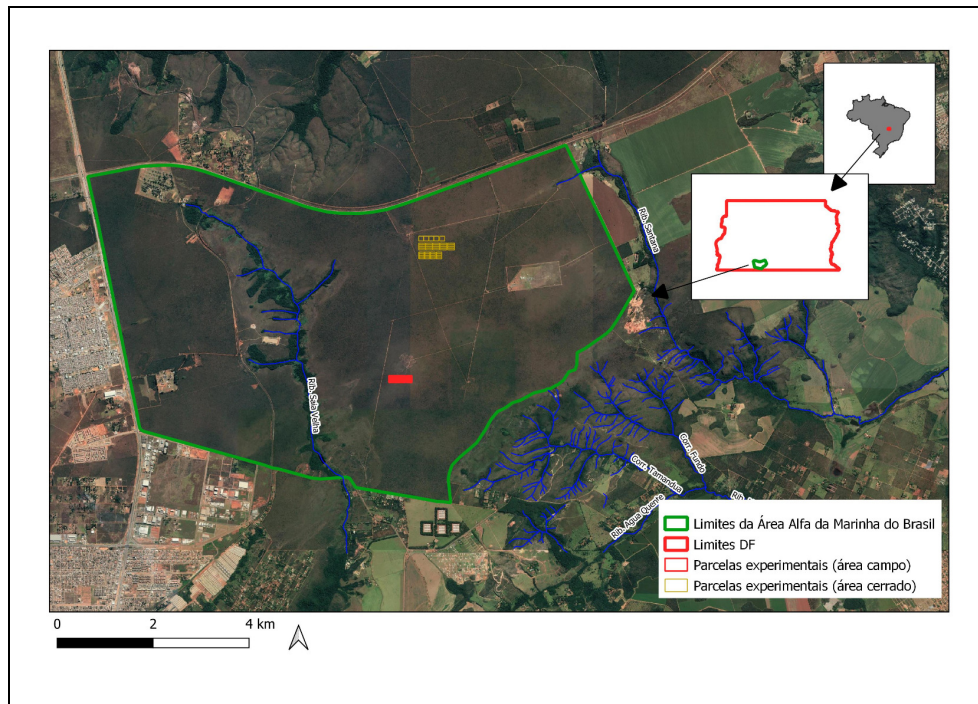


Figura 2. Localização da Área Alfa da Marinha do Brasil, de onde foi tirado parte do material vegetal para gerar combustível em queimas laboratoriais

A colheita do combustível vegetal foi em grande medida um processo mecanizado, com emprego de roçadeira mecânica, acoplada a um micro trator ou pelo método semimecanizado, com roçadeiras individuais movidas a gasolina.



Figura 3. Aspecto fisionômico da maior parte da vegetação utilizada como combustível nos experimentos laboratoriais. A predominância de estrato herbáceo com predominância de gramíneas nativas fornece um combustível relativamente fino e a baixa densidade de arbustos e árvores implica numa baixa fração de serapilheira composta por dicotiledôneas.

O material vegetal foi selecionado, retirando seus elementos mais grosseiros, como galhos e raques grossos, depois foi homogeneizado em contêineres, pesado e armazenado em grandes sacos feitos com tela de sombreamento, para permitir a secagem, à temperatura ambiente em local seco (**Figura 4**). Ao fim desse processo conseguiu-se um combustível homogêneo para ambos os tratamentos testados em queima.



Figura 4. Material selecionado, separado em sacos de tela de sombreamento, secando ao sol em um pátio do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília.

4.2 O retardante Romeo e a preparação do combustível

O RCD empregado neste estudo foi apelidado de Romeo. Trata-se de estratégia para ocultar o seu nome comercial, já que não faz parte da estratégia do projeto Prometeu adotar pseudônimos, visando não promover qualquer marca ou empresa privada.

O retardante de chamas Romeo caracteriza-se por ser um pó branco-acinzentado, sem cheiro marcante, solúvel em água. O fabricante afirma que seu produto é composto basicamente de carboidratos, celulose e minerais, portanto eminentemente orgânico além de atóxico e não inflamável, sendo indicada um preparo de solução aquosa de 0,06% ($0,6 \text{ g.l}^{-1}$), equivalente a 2,4 g de retardante em um balde contendo 4 litros de água (**Figura 5**).



Figura 5. Retardante sendo pesado

Optou-se por uma taxa de aplicação de 0.33 l.m^{-2} (Braga, 2022), que representa um valor medido em campo nas fases anteriores do Projeto Prometeu, como sendo aquele típico de aplicação com bombas costais pulsáteis usadas pelos combatentes florestais em combate direto. Este valor foi utilizado tanto para a amostra de combustível com solução retardante (leito da esquerda da Osiris) quanto do controle com água (leito direito).

Cada leito tem a dimensão de 1,5 metro x 1 metro, de modo que para se atingir a taxa de aplicação de 0.33 l.m^{-2} , lançou-se 500ml, seja de solução com retardante ou de água, por leito.

Porém, antes da aplicação da solução com retardante ou água, uma fração de aproximadamente 150 gramas da amostra de combustível foi reservada como estopim. O combustível foi adicionado aos leitos de combustão, depois tratado com água ou solução retardante. O estopim (capim seco) foi adicionado posteriormente, na borda do leito onde pretendia-se iniciar a queima. Sobre o estopim de capim, adicionou-se um outro estopim de cordão de algodão embebido em solução 1:1 de gasolina e etanol. Este sistema de estopim, ao ser aceso simultaneamente em ambos os leitos, permitiu o desenvolvimento de uma frente de fogo rápida e idêntica em ambos os lados da Osíris.

4.3 O planejamento das queimas

O panorama geral do procedimento de queima é brevemente apresentado em fluxograma de 14 processos principais e 3 laterais (**Figura 6**). Esse esquema, embora simplificado, expõe o passo-a-passo básico das queimas experimentais levadas a cabo ao longo da pesquisa.

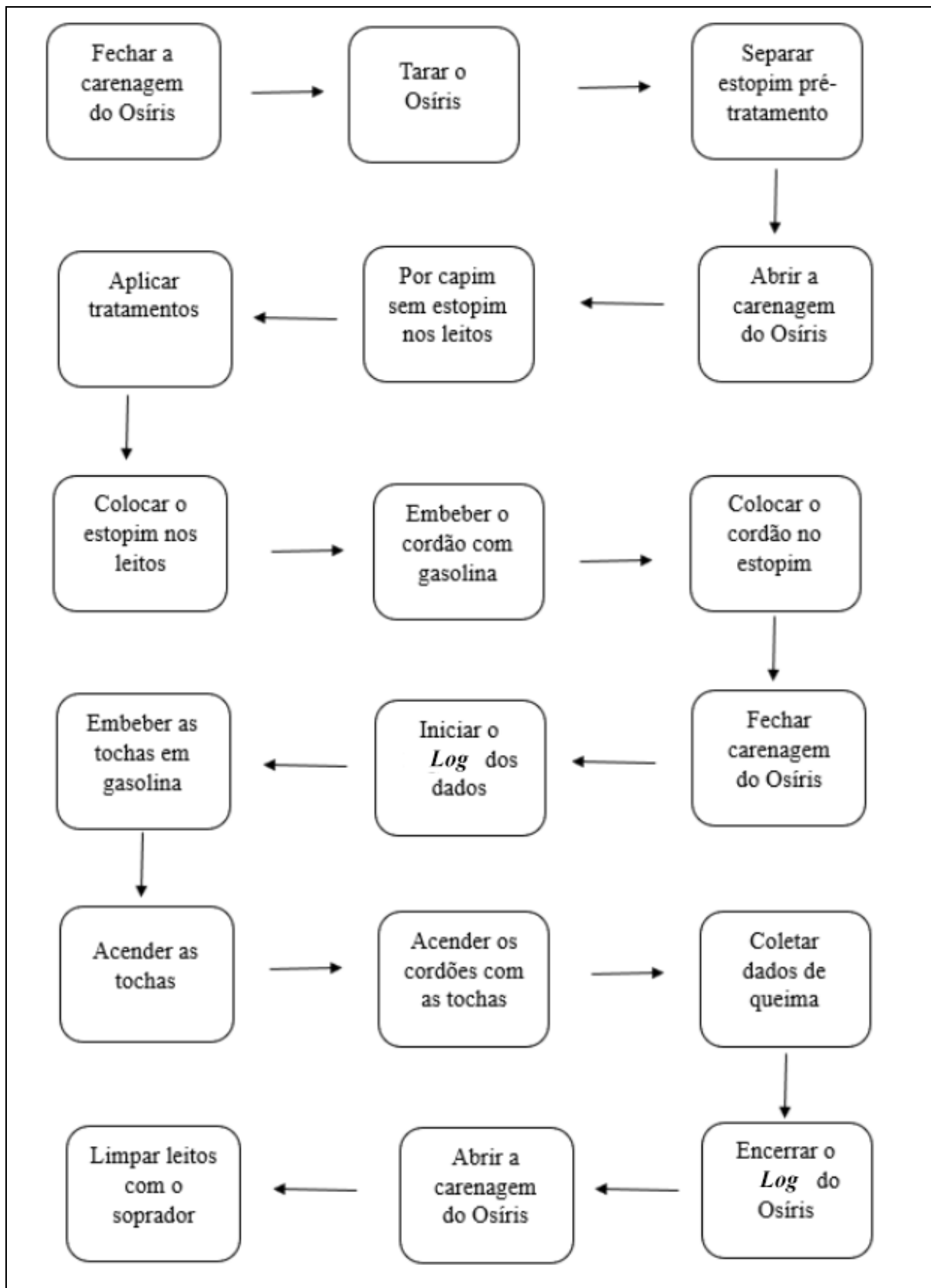


Figura 6. Fluxograma geral do funcionamento da queima experimental com o DTG Osiris, portando 17 passos essenciais para a realização das queimas. Trata-se de um processo cíclico, o início é quando o Osiris está aberto, sem carenagem, sem cinza nos leitos, isto é, limpos com o soprador.

Para a realização das queimas foi necessário manejar coordenadamente maquinário, material de consumo e trabalho organizado em equipe. Os materiais de segurança foram: equipamentos proteção individual, EPIs, como luvas para proteção térmica, bem como extintor de incêndio, bomba costal abastecida com água (**Figura 7**).



Figura 7. Sacos com capim, soprador, extintor de incêndio, bomba costal.

Os materiais diretamente responsáveis pela ignição das queimas eram mantidos separados dos sacos de combustível florestal, à sombra e longe de fiação e demais aparelhos elétricos e eletrônicos (**Figura 8**).



Figura 8. Material de ignição para iniciar as queimas, da esquerda para a direita: cordões embebidos em gasolina, tochas, galão de gasolina e cordões secos. Esses componentes foram mantidos, por medidas de segurança, afastados do combustível florestal na preparação das queimas.

Parte do leito de combustão teve uma parte de combustível florestal retirada antes que este fosse tratado com água ou solução de retardantes de chamas, essa porção foi chamada de estopim, cujo objetivo foi dispor de mesma temperatura inicial elevada para ambos leitos de modo a verificar a possível ação retardante em temperaturas próprias de um incêndio florestal. Nesse estopim foi inserido um cordão embebido em gasolina para iniciar a queima (**Figura 9**).



Figura 9. Bandeja com retardante (de baixo) e com água (de cima), ambos com aproximadamente 20 cm de largura. Os estopins não receberam água nem solução com retardante, o cordão embebido em álcool e gasolina ficou com três pontas para fora de modo a receber facilmente o calor da tocha acesa e iniciar a queima ao mesmo tempo com a mesma intensidade para os dois tratamentos.

4.4 Modelo Gravimétrico para Cinética de Perda de Massa (MoG-CPM)

O MoG-CPM transformou os dados de peso, em gramas, para percentual de combustível remanescente, acrescido da massa de água ou solução retardante adicionada. Assim, todas as queimas iniciaram com 100% de massa de combustível umedecido com retardantes ou água, havendo um decaimento percentual, o que foi denominado Cinética de Perda de Massa.

O comportamento da massa foi descrito matematicamente em duas expressões: uma delas explica a CPM enquanto a frente de fogo ainda não atingiu a outra extremidade da bandeja (**Figura 10 a**); outra expressão descreve a CPM quando a queima se encontra no estágio residual (braseiro), isto é, sem uma frente de fogo definida (**Figura 10 b**).

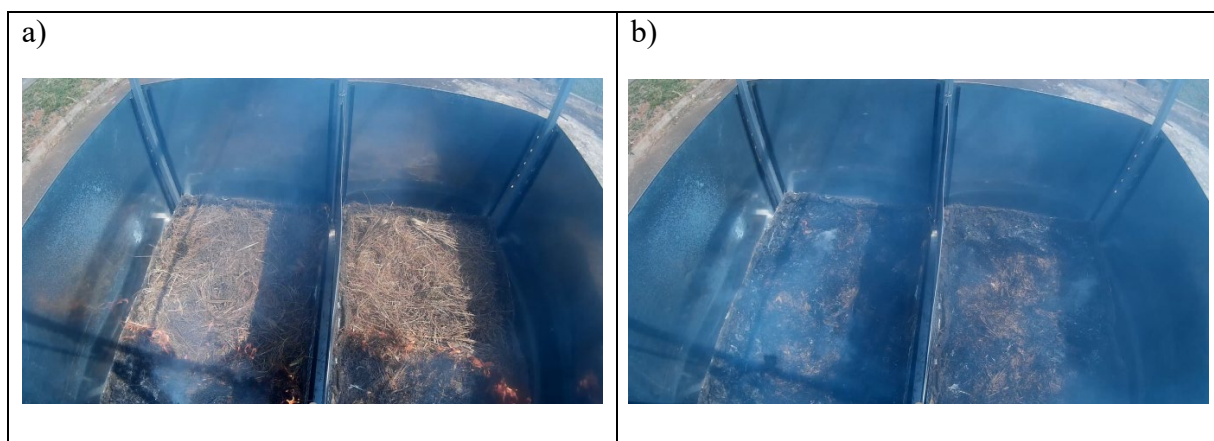


Figura 10. Fotografias obtidas durante a combustão na Osiris, mostrando: **a)** o estágio anterior à chegada da frente de fogo atingir a extremidade oposta do leito e; **b)** o estágio após atingir esse marco.

As duas expressões são funções de decaimento exponencial (**Tabela 1**).

Tabela 1. Expressões matemáticas do MoG-CPM. Cada expressão se ajusta a uma determinada fase, a depender de posição da frente de fogo ter atingido o final do leito ou não.

Fórmula	Equação	Fase
$M(t) = \frac{\Delta M}{L} \left[c \frac{(1 - e^{-Kt})}{K - ct} \right] + Mo$	1	Antes da frente de fogo atingir a extremidade oposta do leito
$M(t) = \frac{\Delta M}{L} \left[c \left(e^{-K(t-L/c)} - \frac{e^{-Kt}}{K} - L \right) \right] + Mo$	2	Após a frente de fogo atingir a extremidade oposta do leito

Fonte: Galileu Paulo Henke Alves de Oliveira.

Onde:

c = Coeficiente relacionado ao avanço do fogo

K = Taxa intrínseca de combustão

L = Comprimento da bandeja, nesse caso de 1,5 metro

M_0 = Massa inicial

t = Tempo de cada fase da queima

ΔM = Massa final menos a inicial

e = Número de Euler

No método, K é uma constante relacionada à inflamabilidade do material, ou seja, um indicador da facilidade da combustão do material; c é uma constante relacionada à velocidade da frente de fogo, portanto à sua combustibilidade. O parâmetro K , como estimador indireto da inflamabilidade, deve ser comparado com a temperatura da queima e velocidade das chamas, porque, em conjunto, esses três fatores expõem a propensão à queima do material.

O fator c está indiretamente ligado à velocidade de propagação do fogo, pois a expressão trabalhou com a ideia de propagação linear do fogo para gerar o modelo mais apropriado. O problema é que o avanço da linha do fogo linearmente não aconteceu em qualquer dos experimentos, uma vez que o fogo sempre consumiu o combustível de forma irregular, com os chamados ‘dedos’ do incêndio. Diante disso o significado do fator c deve ser compreendido como um auxiliar não-determinístico da velocidade do fogo, com outros fatores a serem observados.

Este modelo foi proposto pelo engenheiro químico Galileu Paulo Henke Alves de Oliveira (em colaboração) e a execução foi conduzida no *software* de computação gráfica GNUplot®, um sistema livre baseado em scripts, com função principal de produção de gráficos, mas com grande potencial de desenvolvimento de complexos modelos de ajuste de curva.

Outras duas métricas criadas a partir do MoG-CPM foram: a Massa Relativa Consumida (E) e o parâmetro de Redução (R), ambos percentuais. A métrica E mostra

proporcionalmente quanta massa foi perdida na queima, enquanto o critério de Redução mostra a diferença proporcional do tratamento Água em relação ao Remeo nos parâmetros E, c e K (Tabela 2).

Tabela 2. Fórmulas de Massa Relativa Consumida (%), Redução de: Massa relativa consumida (%); Indicações de velocidade (%) e de intensidade (%).

Fórmula	Parâmetro
$E(M) = \frac{(M_o - M_f)}{M_o} * 100$	Massa Relativa Consumida
$R(E) = \frac{(E_{Retardante} - E_{Água})}{E_{Retardante}} * 100$	Redução de E
$R(c) = \frac{(c_{Retardante} - c_{Água})}{c_{Retardante}} * 100$	Redução de c
$R(K) = \frac{(K_{Retardante} - K_{Água})}{K_{Retardante}} * 100$	Redução de K

O sinal de R tem a seguinte lógica, para os três parâmetros: se $R < 0$, o RCD é mais eficiente do que a água; se $R > 0$, o RCD é pior do que a água; se $R = 0$, RCD é tão eficiente quanto à água.

4.5 Estudo da umidade no combustível florestal usando o DTG Osiris

O Osiris também foi utilizado para mensurar a oscilação do peso do combustível em função da variação da umidade ambiente. O dispositivo termogravimétrico foi colocado nas dependências do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília em local aberto, porém ao abrigo da luz solar.

Cada bandeja foi preenchida com um quilograma de capim seco e, sobre uma delas foi aplicado 0,5 litro de água, enquanto na outra se aplicou 0,5 litro de solução retardante dissolvida em água na mesma concentração usada nas queimas. A coleta de dados ocorreu ao longo de uma semana com os dados logados a cada 5 minutos.

Visando calcular o teor de umidade do combustível ao longo deste período, foi necessário obter o seu peso seco. Assim, o mesmo material submetido no ensaio foi seco em estufa a temperatura de 60° C até o peso constante.

4.6 Modelo Termal Hórus

O modelo Hórus é uma representação gráfica obtida por pós-processamento dos dados do imageador termal da Osíris. Ele se propõe a produzir mapas dinâmicos, na forma de vídeos (.mp4) e animações (.gif) onde são apresentadas as temperaturas registradas na matriz do sensor, sendo organizadas estatísticas para ambos os leitos, tais como temperaturas máximas e médias, bem como a identificação da frente de fogo, com a qual se obtém os dados de velocidade das frentes (**Figura 11**).

O *software* foi criado em linguagem Python pelo orientador do TCC. O código possui 1000 linhas e depende de alguns parâmetros de entrada, como temperaturas limites para a identificação de ignição e coordenadas dos limites dos leitos. O criador desse programa é o Pr. Dr. Carlos Henke de Oliveira.

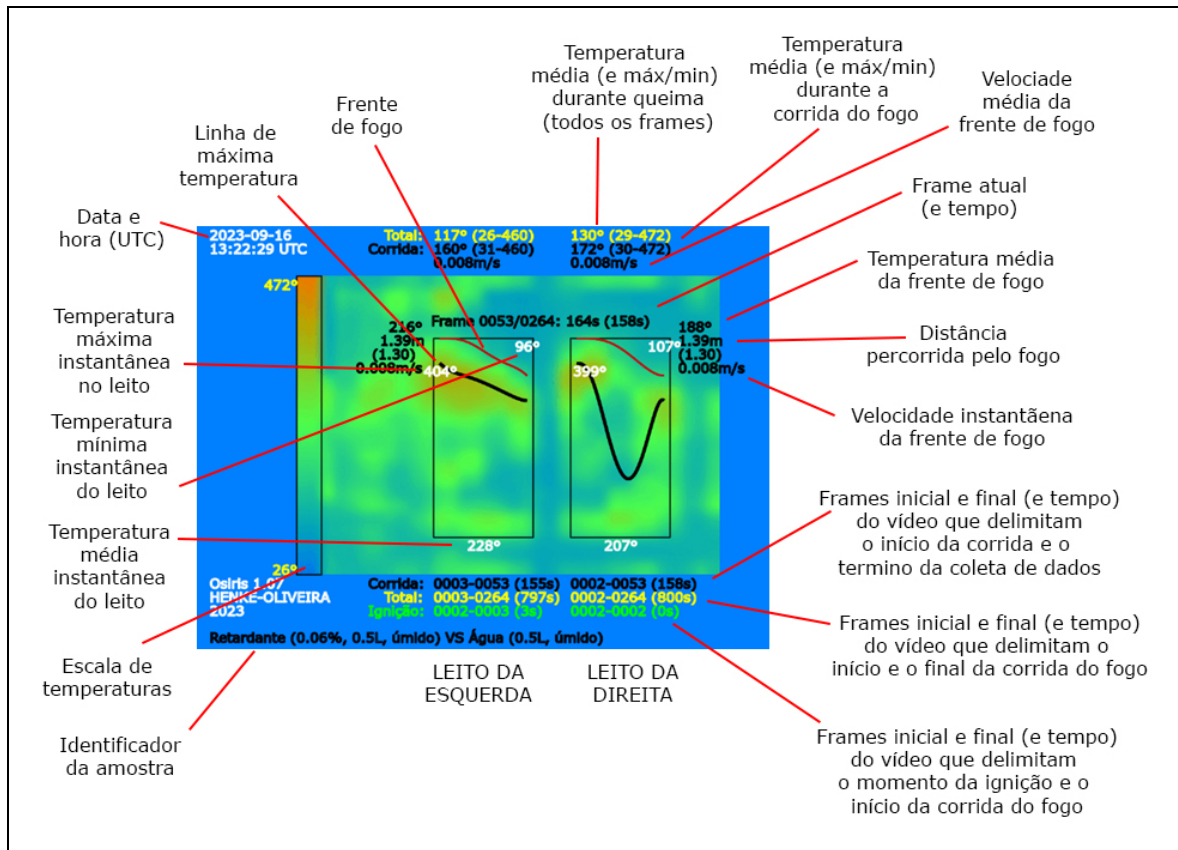


Figura 11. Legenda explicativa da representação Hórus da Osiris 1.07, com estatísticas para ambos os leitos (esquerda e direita). As linhas vermelhas indicam a posição instantânea de frente de fogo e as linhas pretas mostram as isolinhas de maior temperatura. Dados de temperaturas (mínima, máxima, média instantâneas são mostradas nos números brancos). Neste exemplo, a imagem mostra o frame número 53 (de um total de 264), equivalente a 164 segundos após o início do registro. No leito da esquerda, a ignição foi detectada entre o frame 2 e 3 (durando 3 segundos), a corrida da frente de fogo esteve entre os frames 3 e 53, durando 155 segundos, e as temperaturas indicaram queima remanescente por 797 segundos, com temperatura média de 177°C e velocidade da frente de 0,008 m/s. Para o leito da direita, estas estatísticas são mostradas no seu local correspondentes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados

Ao total foram realizadas 6 queimas, uma 16/09/2023 e as 5 em 16/10/2023. O local foi o estacionamento interno do Instituto de Ciências Biológicas (IB) da Universidade de Brasília, coordenadas -15,766° de latitude, -47,864° de longitude e a 1024 metros de altitude. nossas queimas ocorreram nos horários mais quentes (**Tabela 3**), ao redor do meio-dia de

maneira a expor o retardante nas condições nas quais ele será exigido em incêndios florestais, no pico do calor, em estação seca, com bastante insolação e vento.

A duração média de cada queima foi de 24 minutos, variando de 20 a 40. Embora a aquisição dos dados fosse mais prolongada, o tempo de chamas visíveis com alta liberação de calor ocorreu somente nos minutos iniciais.

Tabela 3. Cronograma de queimas realizadas, em horário local (Brasília) e duração

Data	Réplica	Tempo Inicial	Tempo Final	Duração
16/09/2023	1	09:53:11	10:35:55	00:42:44
16/10/2023	2	10:23:57	10:49:04	00:25:07
16/10/2023	3	11:13:18	11:41:39	00:28:21
16/10/2023	4	12:03:53	12:21:45	00:17:52
16/10/2023	5	15:04:36	15:25:38	00:21:02
16/10/2023	6	15:47:19	16:08:40	00:21:21

As condições meteorológicas mostravam-se típicas da época do ano (Tabela 3), com temperatura média de 34,29 °C, variando da menor medida de 27,79 °C, e a maior 37,61 °C, com a umidade em patamares bem baixos, oscilando ao redor de 40,84%, e a velocidade média do vento de 2,82 m.s⁻¹ (Tabela 4).

Tabela 4. Condições meteorológicas médias durante as queimas

Data	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m.s ⁻¹)
16/09/2023	27,79	61,05	3,06
16/10/2023	34,76	39,69	2,69
16/10/2023	33,82	38,55	2,98
16/10/2023	34,64	37,79	2,75
16/10/2023	37,61	34,76	3,11
16/10/2023	37,13	33,21	2,35
Média Geral	34,29	40,84	2,82

A (Figura 12) ilustra uma das queimas realizadas, apresentando os dados de massa em gramas, ou seja, antes de ser convertido para percentual. Nela observa-se que o peso medido não equivale à massa de combustível adicionada (1500 gramas). Isso ocorre porque a adição de água ou retardante implica no aumento do peso. Ao mesmo tempo, desde o início da

adição até a ignição ocorre evaporação, portanto perda de massa. A adição de todos esses fatores nos cálculos permitiu expressar a CPM em percentual.

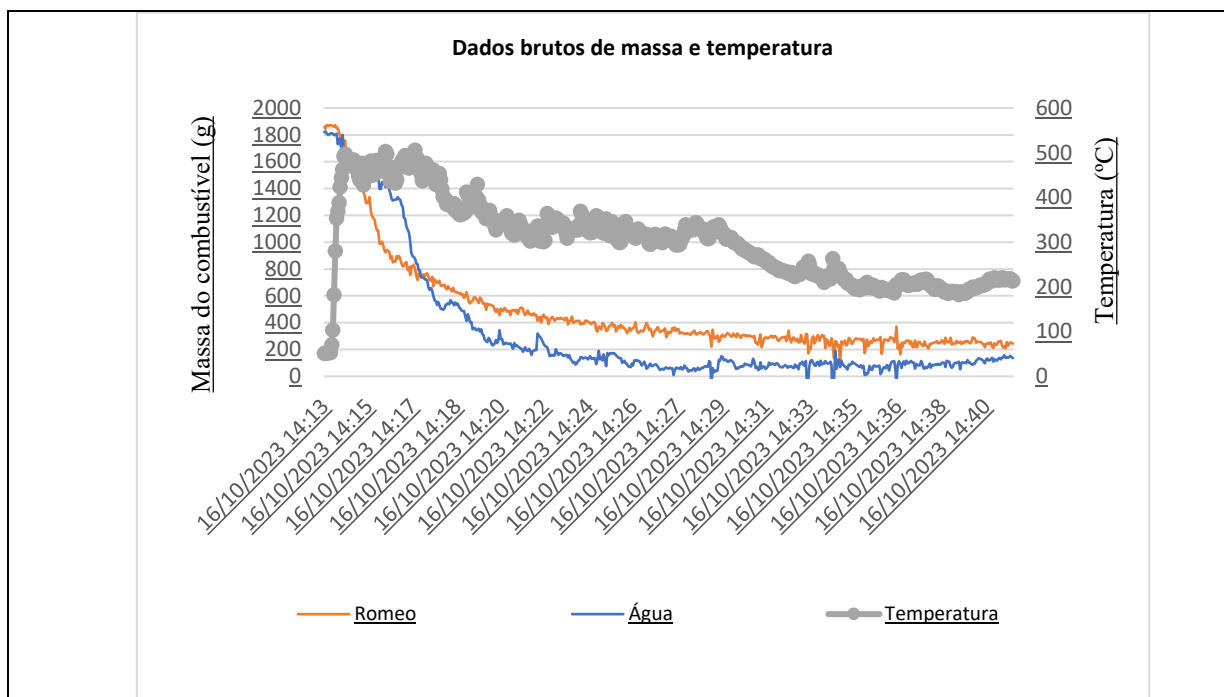


Figura 12. Exemplo de dado bruto oriundo das células de carga, que indicam o valor de massa (gramas) de material remanescente. Deve-se observar que a massa inicial de combustível é 1500 g, que difere dos valores do gráfico (aprox. 1800 gramas). Isso se deve ao fato de que a adição de 500 ml de retardante (e de água) implica e adição de 500 gramas em cada leito, o qual tende a reduzir em função da evaporação entre o ato da adição do líquido e o início da queima. Tais dados foram incorporados nos cálculos, visando analisar a cinética de perda de massa em percentual e não em valor absoluto de massa.

Os gráficos das queimas com o MoG-CPM embutido são expostos (**Figura 13**) com seus parâmetros, são eles: a Massa Inicial (m_0) com valores próximos a 100%; Massa Final (m_f), representando o quanto sobrou em percentagem de massa após a queima em termos proporcionais; a Massa Consumida Relativa (E), sendo proporcionalmente a fração queimada do combustível, isto é, o quanto o tratamento não impediu de queimar; o Fator c , tendo relação indireta com a velocidade da queima; e o Fator k , sendo indicador da intensidade de queima.

No início da CPM, dos primeiros 200 a 400 segundos (**Figura 13**), as linhas de massa dos tratamentos cruzaram-se, definindo-se, nessa parte mais acentuada da curva de

decaimento, a diferença entre as massas de cada tratamento, que foi basicamente mantida até o fim das queimas. A massa inicial variou de 93% a 100%, isso se deveu a ajustes no algoritmo do modelo, que permitiram pequenas flutuações nesse valor inicial da massa para adequar os valores de c e K , indicadores, respectivamente, de combustibilidade e inflamabilidade.

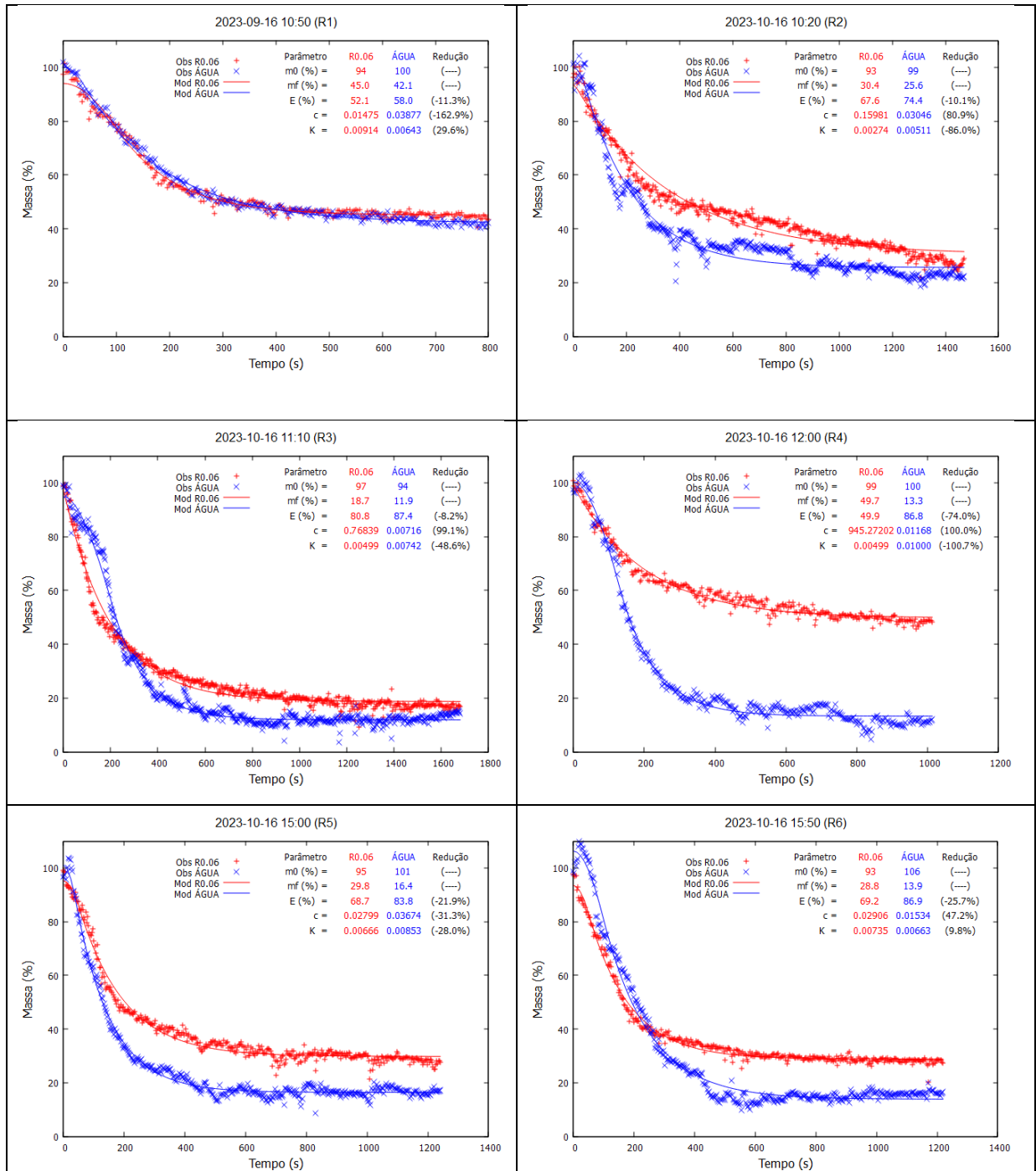


Figura 13. Cinética de perda de massa (%) nas seis réplicas. Ao topo de cada gráfico mostra-se a data e horário de início da queima, bem como a réplica (R1 a R6). As séries temporais de água e retardante (R0.06 – Romeo a

0.06%) são descritas graficamente (curvas) e por meio dos parâmetros do modelo MoG-CPM (m_0 = massa inicial, m_f = massa final, E = eficiência d combustão), c = indicativo de velocidade e K =indicativo de inflamabilidade), bem como a redução em cada um desses fatores ao comparar o tratamento (R0.06) ao controle (água).

A perda de massa no tratamento com Romeo diferiu do com água, de modo que o RCD sempre finaliza as queimas com mais massa remanescente, não consumida, do que sua contraparte com água. A amplitude dessa diferença variou de 2,9%, na réplica 1, a 36,4%, na réplica 4 (**Figura 14**).

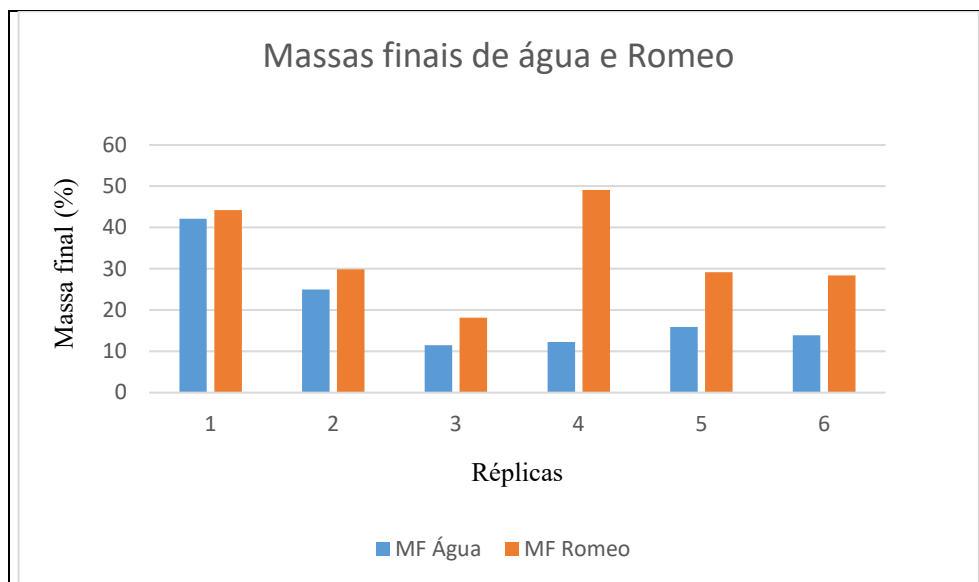


Figura 14. Massas residuais (Mf) do tratamento com água e com o Romeo

O fator K , foi, nas réplicas 1 e 6, maior no tratamento Romeo, e maior no tratamento água para as demais réplicas (**Figura 15**), logo na maioria das queimas o RCD apresentou melhor desempenho do que a água nesse quesito.

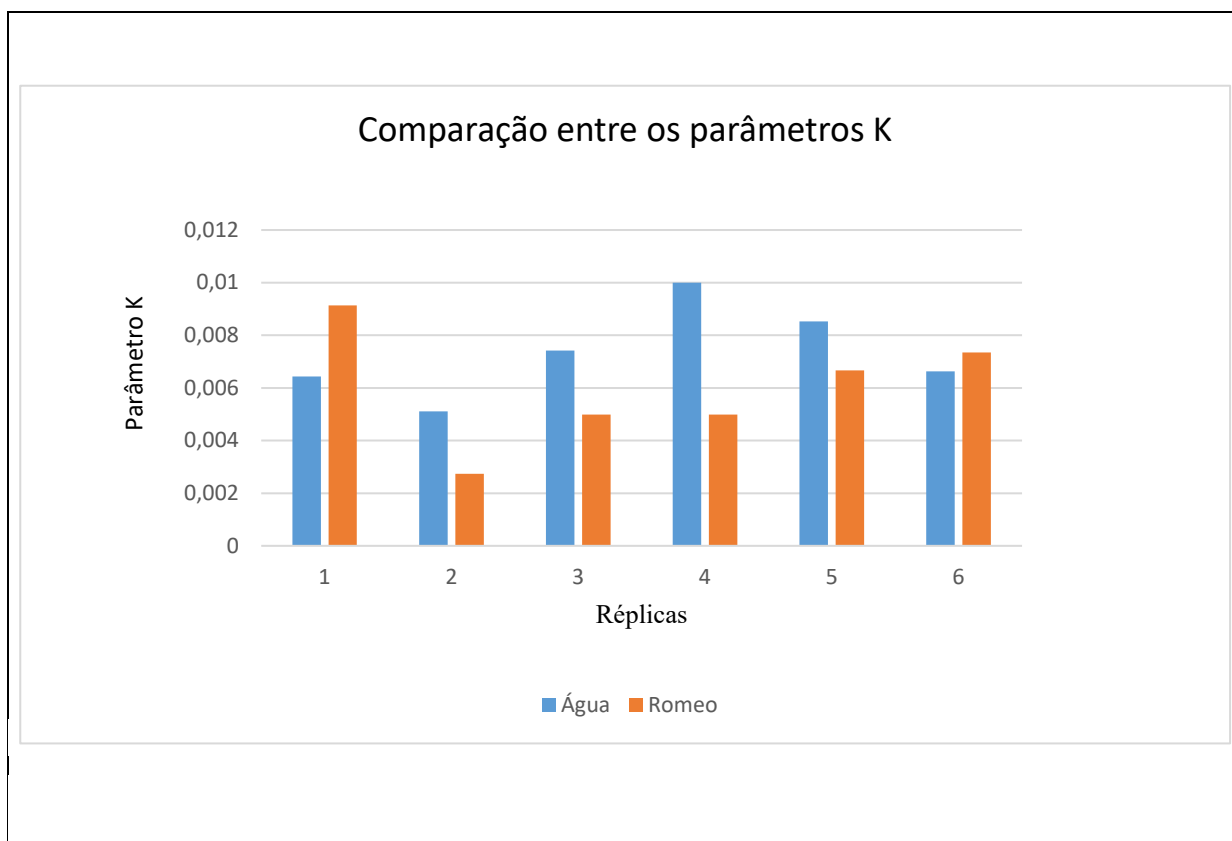


Figura 15. Comparação entre os componentes K obtidos nos tratamentos Água e Romeo. O 'K' na Água foi maior nas réplicas 2, 3, 4 e 5 e menor nas réplicas 1 e 6.

O fator c não conseguiu ser devidamente ajustado, assim a comparação com os dados brutos de velocidade da frente de avanço do fogo oriunda do modelo Hórus não foi feita, de modo que as médias finais do MoG-CPM foram Massa Final, Massa Relativa Consumida e K (Tabela 5). De toda forma fez-se análise de variância (ANOVA) de fator único a 5% de significância, com F calculado de 1,002 para um F tabelado de 4,9646.

O RCD Romeo apresentou (Tabela 5) os menores valores de massa final, massa relativa consumida e indicativo de inflamabilidade, o que pareceu indicar um desempenho melhor em relação à água enquanto retardantes de chamas.

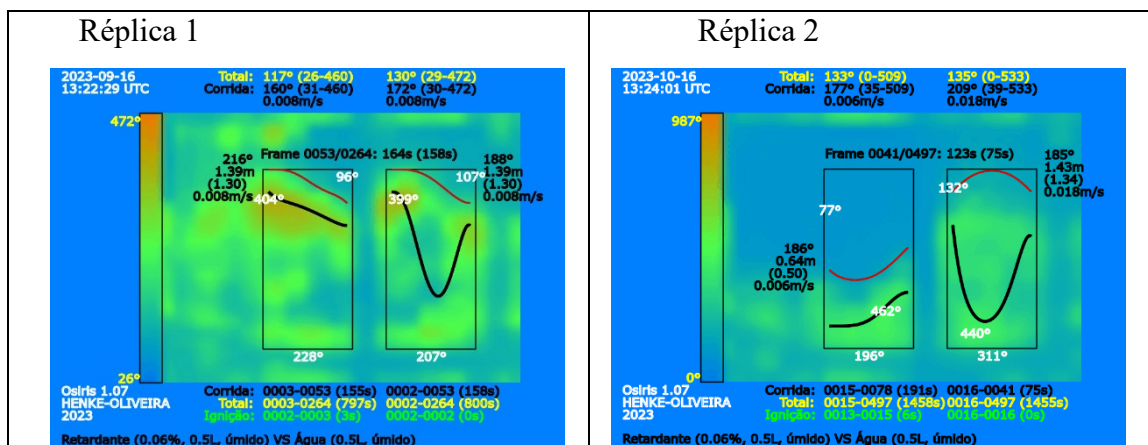
Tabela 5. Médias de: Massa Final (Mf), Massa relativa consumida (E) e Indicativo de inflamabilidade (K)

Tratamento	Mf (%)	E (%)	K
Romeo	33,73	64,72	0,0060
Água	20,53	79,55	0,0073

Contudo, do ponto de vista estatístico, a ANOVA de fator único a 5% de significância não indicou diferença estatística para quaisquer desses fatores do MoG-CPM, com F calculado de: 3,9081 para Mf; 1,4328 para K. O F tabelado foi de 4,9646.

O modelo Hórus apresentou dados brutos de temperatura e velocidade da frente de avanço do fogo (FAF) em animações que também agregam data, horário UTC e paleta de cores, vermelho para o mais quente e azul para o mais frio. As capturas de tela (**Figura 16**) são do momento em que a FAF alcança o lado oposto do leito de combustão. Na réplica 1 as frentes dos dois leitos chegam ao mesmo tempo; nas réplicas 2, 4 e 5 o a frente chegou primeiro no leito com água; nas réplicas 3 e 6 a frente alcançou primeiro no leito com retardante.

A interface mostrou que: a FAF, mesmo em uma extensão de apenas 1,5 m², foi curvilínea, não linear; a região com pico de temperatura estava na retaguarda da frente de avanço; a FAF fez sua corrida entre o mínimo de 53 segundos, no tratamento água da réplica 5, e o máximo de 191 segundos no tratamento Romeo da réplica 2, ou seja, aproximadamente entre 1 e 3 minutos; as velocidades seguiram o padrão oposto ao tempo de corrida, isto é, os menores tempos converteram-se nas maiores velocidades e vice-versa.



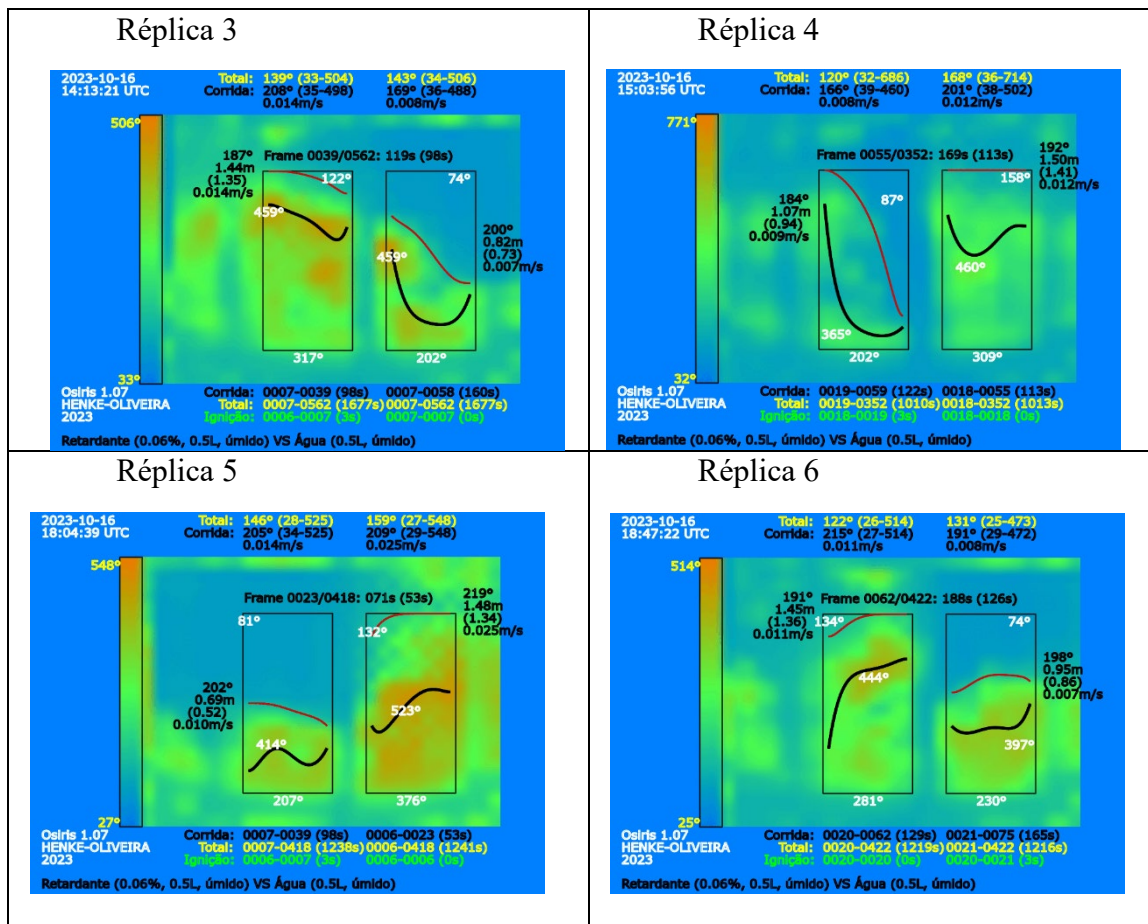


Figura 16. Interfaces do modelo Hórus, sendo: o leito esquerdo o Romeo e o direito, a água; Frente de avanço do fogo (°C), em vermelho; Linha da máxima temperatura (°C), em preto; Temperatura média de toda a queima (°C), em amarelo, no topo (entre parênteses estão o mínimo e o máximo); Abaixo desta, a Temperatura média do estágio de corrida (°C), em preto, com máximo em parênteses; Abaixo desta, a Velocidade média da frente de avanço do fogo ($m.s^{-1}$), em preto; embaixo na figura, o Tempo do estágio de corrida (s), em preto; abaixo desta, o Tempo de toda a queima (s), em amarelo.

Ao olhar especificamente para a velocidade da FAF (**Figura 17**) foi idêntica para os dois tratamentos na réplica 1; superior para o tratamento Romeo nas réplicas 3 e 6; e superior para o tratamento água nas réplicas 2, 4 e 5. Então o RCD Romeo mostrou-se com melhor desempenho do que a água, nesse quesito, na metade das réplicas em que foi testado.

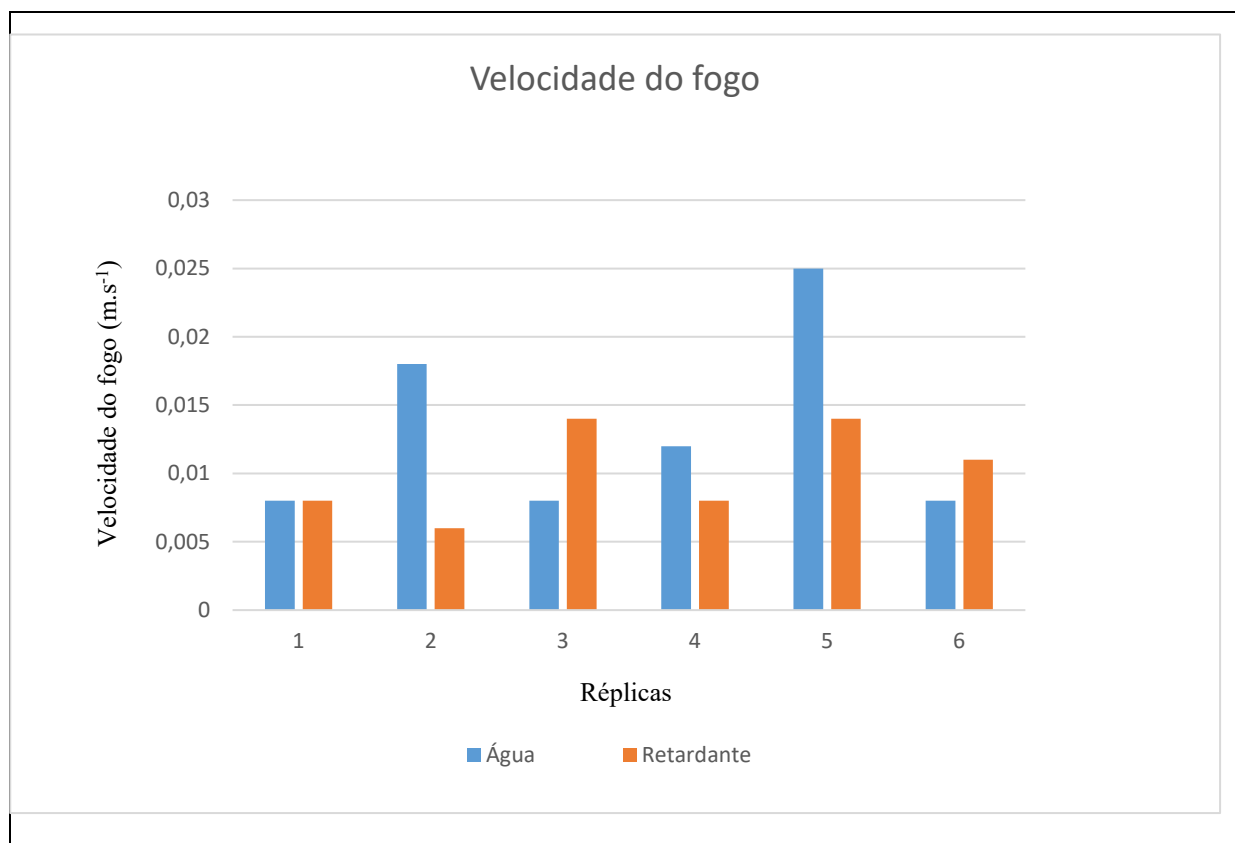


Figura 17. Velocidade do fogo com água e o outro composto de retardante ao longo das seis réplicas, usando o imageamento do *software* Hórus.

O RCD Romeu demonstrou (**Tabela 6**) os valores mais baixos de temperatura total, temperatura na corrida e velocidade do fogo, algo que aponta para seu melhor caráter retardante de chamas em comparação com a água.

Tabela 6. Médias de: Temperatura total, em ambos estágios da queima; Temperatura na corrida, apenas no primeiro estágio da queima; Velocidade do fogo, medida apenas no primeiro estágio da queima.

Tratamento	Temperatura total (°C)	Temperatura na corrida(°C)	Velocidade do fogo (m.s ⁻¹)
Romeo	129,5	188,5	0,010
Água	144,3	191,5	0,013

Não se encontrou diferença estatística entre os tratamentos ao se fazer a ANOVA de fator único a 5% de significância para esses fatores do modelo Hórus, com F calculado de: 3,4293 para Temperatura total; 0,0758 para Temperatura na corrida; 0,8950 para Velocidade do fogo. O F tabelado foi de 4,9646.

É fundamental entender que o estudo gravimétrico para a análise da variação da umidade do combustível, algo que ocorreu ao longo de 11 dias, deve ser observado sob duas perspectivas distintas:

- a) Nas primeiras horas (entre até 12 ou 24 horas), a umidade adicionada haveria de reduzir drasticamente, porém se o retardante de chamas (Romeo) aumentasse a retenção da água, tal queda deveria ser mais lenta que a queda do leito contendo apenas água.
- b) Ao longo dos períodos subsequentes, ou seja, ao longo dos 10 dias restantes, a umidade do combustível haveria de oscilar como consequência da oscilação da umidade relativa do ar, porém caso o retardante (Romeo) apresentasse maior capacidade de retenção de água, as oscilações no leito com retardante deveriam ser mais brandas, se comparado ao leito com água. Além disso, o leito com retardantes deveria reter, no geral, maior quantidade de água.

Assim, o estudo gravimétrico ao longo 11 dias revelou forte queda do teor de umidade no combustível, de 33% a 10% no caso do tratamento com O RCD Romeo e de 33% a 5% no caso da água, em 24 horas, mesmo em condições de umidade relativa do ar entre 80% e 50% (**Figura 18**).

Após esse primeiro dia de experimento, a umidade no combustível no tratamento com água variou de 5% a 15% e a umidade no tratamento com RCD Romeo esteve entre 3% e 10%, portanto o tratamento Romeo demonstrou ao longo do tempo um teor mais baixo do que o tratamento com água (**Figura 18**).

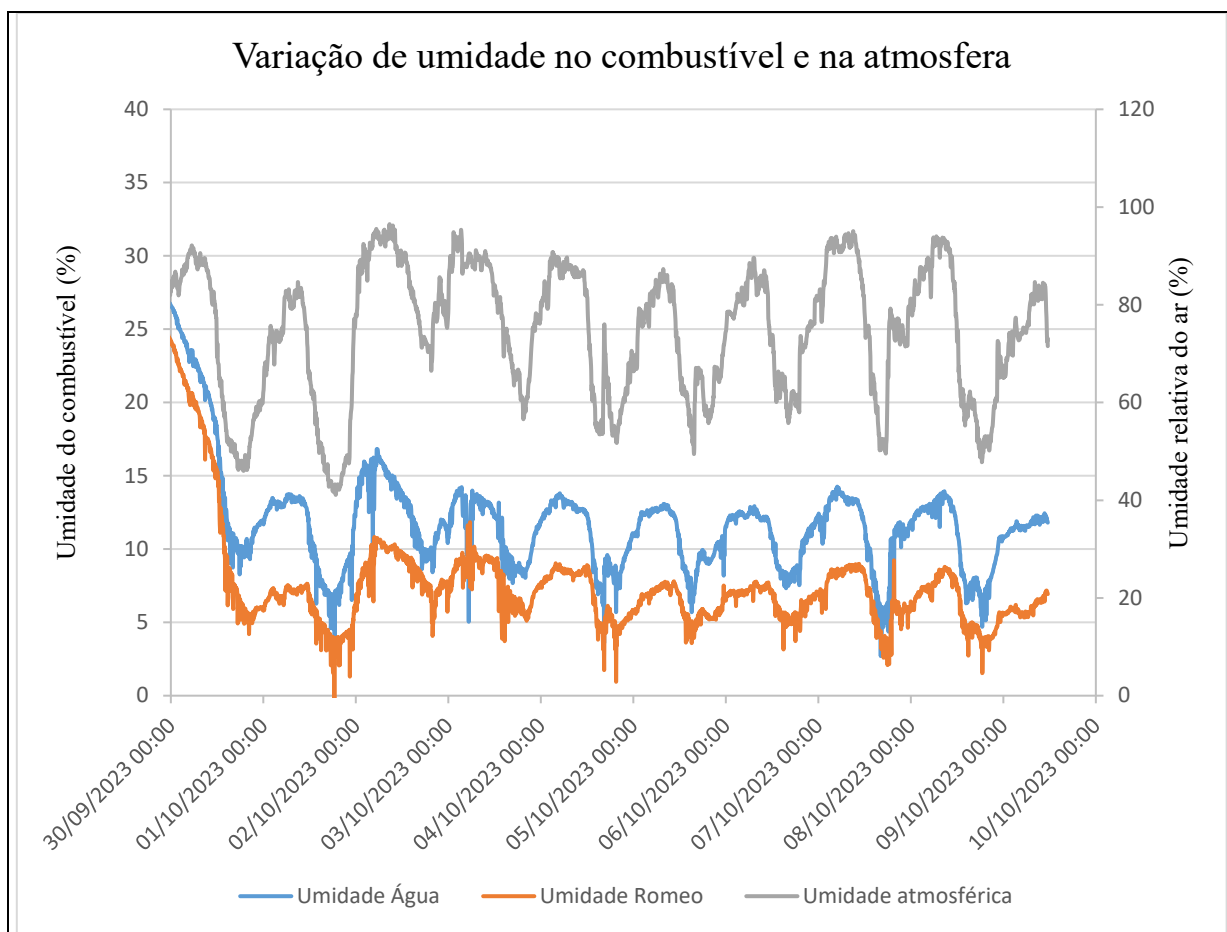


Figura 18. Ensaio de absorção e perda de água. Umidade do combustível e umidade relativa do ar durante o ensaio de secagem após a adição de água (ou retardante) e a o efeito da umidade do ar sobre o ganho e perda de água no combustível.

Em experimento de secagem em mufla feito depois desse estudo gravimétrico, constatou-se que o teor de umidade inicial no capim, antes da adição dos tratamentos, era de 3,4%.

Os resultados da análise da determinação do peso remanescente do combustível florestal e a umidade relativa do ar, revelou-se que parte considerável (82,9%) do peso remanescente do capim no tratamento com água é explicada pela umidade relativa do ar, em quanto esse índice é de 73,32 % no caso do tratamento com RCD Romeo (**Figura 19**). Essa taxa de explicação do fenômeno é consideravelmente alta, estatisticamente falando.

Já os coeficientes angulares, 0,1679 para o tratamento com água e 0,1159 para o tratamento com retardante Romeo, indicaram que a uma dada elevação na umidade atmosférica implica numa maior elevação no combustível do tratamento água, que o leito contendo a tratamento. Estes dados, novamente não sugerem que o retardante tenha efeito

benéfico em manter o material combustível mais úmido como decorrência do ganho de água atmosférica.

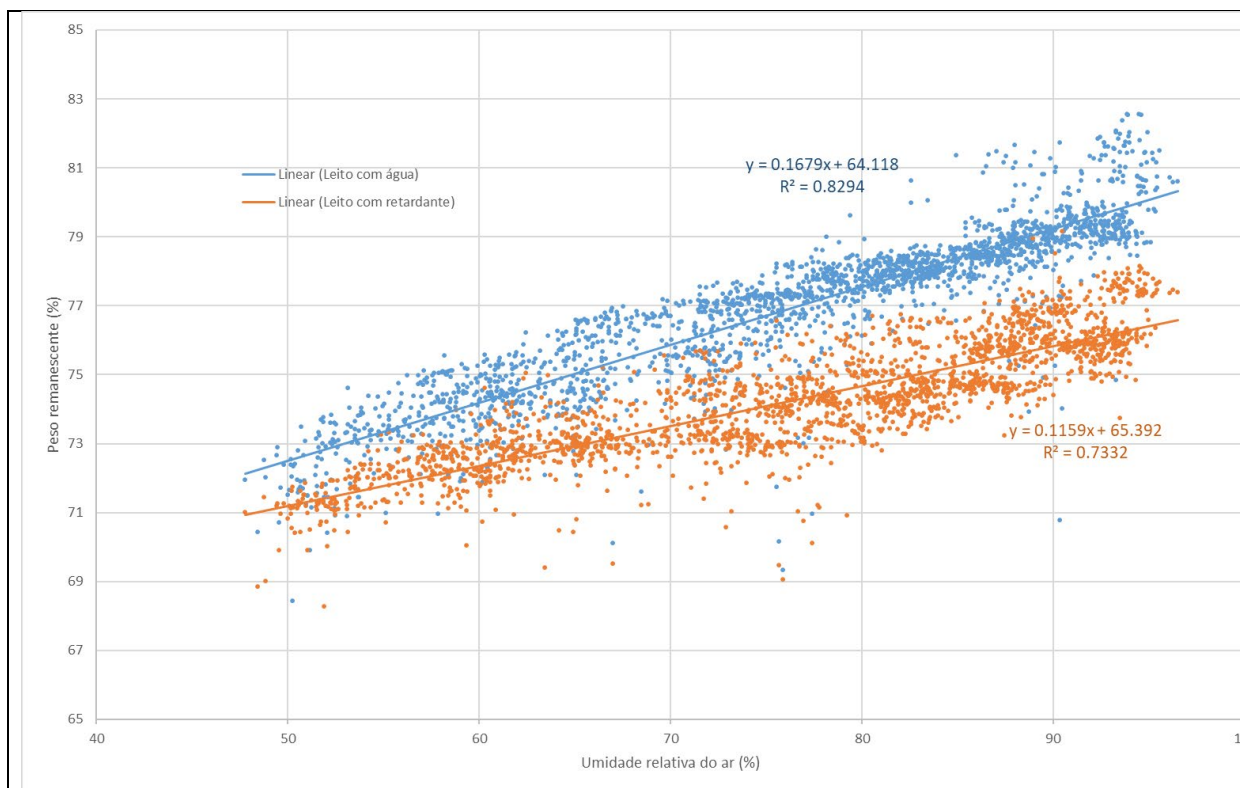


Figura 19. Determinação entre umidade relativa e perda de peso ao longo do tempo

Basicamente o estudo da umidade no combustível florestal teve dois resultados principais: a forte relação do teor de umidade em ambos os tratamentos com a umidade relativa do ar; e nenhuma evidência estatística de maior retenção de umidade no tratamento com RCD Romeo em relação ao tratamento com água.

5.2 Discussão geral

Quanto às queimas, o primeiro tópico a ser esclarecido é a atipia nos resultados da réplica 1. É preciso destacar que na primeira réplica, a adição de retardante seguiu o procedimento normal que já havíamos adotado com outros produtos retardantes, os quais não alteraram a viscosidade da solução. Tudo indica que não houve boa mistura da solução retardante com o combustível.

Era notável a alta viscosidade da solução com RCD, de difícil mistura no combustível florestal e, sem bastante manipulação o RCD não se espalharia no capim. Para resolver isso optou-se, nas réplicas posteriores, por revolver mais intensamente o combustível, usando-se das mãos, de forma a melhorar a qualidade da mistura. Obviamente, isso implicou em maior tempo de manipulação. Sabendo-se disso, no combustível com tratamento água, fez-se uma aplicação mais lenta, de forma que o tempo de exposição fosse igual em ambos os leitos, minimizando-se assim, a evaporação diferencial entre os tratamentos. Porém, a viscosidade do retardante era tão elevada, que a manipulação precisou ser muito mais intensa, sob pena de não gerar a mistura adequada. O problema, contudo, é que tal manipulação mais intensa promoveu uma fragmentação maior do material combustível (**Figura 20**). O resultado foi que a granulometria do tratamento Romeo se tornou bem mais fina do que a do tratamento com água e o leito combustível ficou mais compacto que no do tratamento água (**Figura 9**).

Os resultados atípicos da réplica 1, a exemplo do quesito massa final (**Figura 13**), em grande parte se deveram ao baixo espelhamento e penetração do RCD Romeo no combustível florestal.

Nas demais queimas, esse combustível mais fragmentado gerou áreas onde as partes mais finas do capim grudaram-se ao RCD, gerando aglomerados densos, onde o fogo demorou mais a queimar e permaneceu por mais tempo ativo, que, por vezes, foi foco de reiginição.

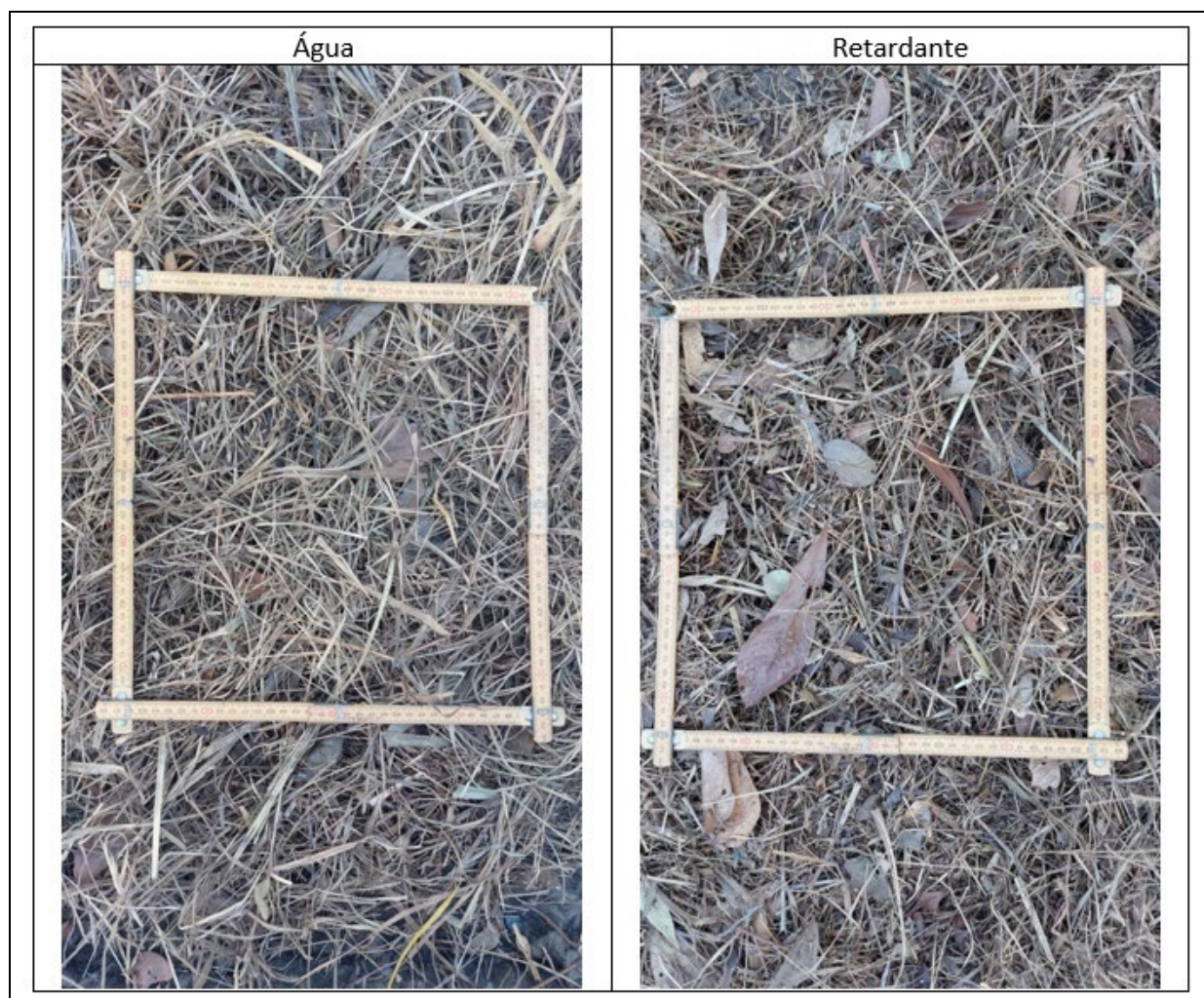


Figura 20. Texturas distintas dos combustíveis em cada tratamento. O tratamento Água preservou melhor a estrutura vegetal do combustível, ao passo em que o tratamento Romeo teve seus componentes foliares esmigalhados por conta da intensa manipulação para o espalhamento do retardante.

Quanto à eficiência do RCD Romeo em si, as diferenças observadas entre os parâmetros inflamabilidade (K), velocidade da frente de avanço do fogo e massa final não foram suficientes para demonstrá-lo como retardante eficiente. O padrão de eficiência que se exige quanto a retardantes para testes de campo e em combate real a incêndios é bastante alto, com poucos retardantes atingindo esse patamar, sendo mais comuns os de longa duração (Braga, 2022).

Sobre o modelo termal Hórus demonstrou: enorme amplitude nos leitos de combustão, com mínimas ao redor de 30 °C e máximas de mais de 700 °C; que as temperaturas mais altas registraram-se no primeiro estágio de queima, durante a corrida da frente de avanço do fogo. Os fatores do modelo termal Hórus: velocidade da FAF, temperatura média no estágio da

corrida e temperatura média em toda a queima foram estatisticamente iguais para ambos os tratamentos.

No que tange ao MoG-CPM, mostrou-se que, na queda abrupta de massa nos primeiros 5 minutos de cada réplica, foi consumida a maior parte da massa do combustível e essa etapa definiu o nível de eficiência do RCD Romeo, que não foi considerável, como afirmado anteriormente.

Quanto aos fatores de MoG-CPM, não foi possível testar a viabilidade do parâmetro K pois as pequenas diminuições no tratamento Romeo observadas em temperatura e velocidade da queima não foram diferiram estatisticamente das da água. O fator c, independente do desempenho do RCD Romeo, carece de ajuste apropriado no modelo para começar a ser testado em experimentação científica. A Massa Final foi o parâmetro mais bem avaliado no RCD Romeo, com 13,20% a mais de massa de combustível não consumida pelo fogo em relação ao tratamento com água, embora não houvesse diferença estatística entre eles.

Sobre o efeito do RCD na manutenção da umidade do combustível florestal, os resultados indicaram pouca influência do RCD nesse processo, inclusive abaixo do tratamento com água em certos períodos. Isso não corresponde ao mecanismo de funcionamento dos RCDs, já que estes trabalham para realçar a permanência da umidade no combustível florestal para que esta absorva mais energia do fogo em sua evaporação e diminua a intensidade das chamas (VIEIRA *et al.*, 2011). Esse resultado pode ser atribuído a uma possível ação impermeabilizante do RCD Romeo nos poros da folhagem seca, que compõe a maior parte do combustível vegetal analisado.

Sobre a praticidade do uso do RCD Romeo em combate a incêndios florestais, a sua alta viscosidade e a formação de material floculado ao preparar a solução tornaram bastante difíceis as condições operacionais para a aplicação do retardante nos êmbolos das bombas costais, inviabilizando-as enquanto ativos eficientes no combate a incêndios florestais.

6 CONCLUSÕES

Não foi observada efetividade significativa do retardante avaliado para a redução da velocidade do fogo, da temperatura e do tempo de queima nos leitos de combustão do material combustível testado. A massa final, MF, foi o único critério em que o retardante mostrou relativa eficiência. O retardante não se revelou apto para testes de campo, fase mais avançada de testagem de retardantes, pois seu efeito de retardo sobre as chamas em escala de pátio foi inconclusivo.

Observou-se que o papel do retardante de chamas Romeo na retenção de umidade pelo combustível florestal durante sua interação com a umidade atmosférica não diferiu significativamente do controle tratado apenas com água. A variação da massa do combustível em ambos tratamentos foi diretamente proporcional à oscilação da umidade do ar.

Em síntese o modelo matemático MoG-CPM não produziu métricas conclusivas a respeito do retardo de chamas em escala de pátio. Os principais parâmetros, K (inflamabilidade) e c (combustibilidade), não foram corroborados pelos dados brutos de massa final e velocidade da frente de avanço do fogo. Recomenda-se reformular a modelagem do MoG-CPM para futuras pesquisas sobre retardantes de chamas.

O modelo visual Hórus facilitou o entendimento do retardo de chamas, notadamente o tempo de cada etapa da queima, a velocidade da frente de avanço do fogo e a distribuição e duração dos focos de calor residuais. Indica-se o modelo Hórus para outras pesquisas acerca de retardantes de chamas para imageamento de queimas e estimador das grandezas acima referidas.

É válido concluir que o RCD Romeo apresentou baixa praticidade nas queimas experimentais, com dificuldades operacionais básicas, de modo que se contraindica seu uso nessas condições para testes de campo e incêndios florestais.

7 REFERÊNCIAS

- ANDERSON, H. Forest fuel ignitibility. **Fire technology**, v. 6, n. 4, p. 312–319, 1970.
- BACKER, D. M.; JENSEN, S. E.; MCPHERSON, G. R. Impacts of Fire-Suppression Activities on Natural Communities. **Conservation biology**, v. 18, n. 4, p. 937–946, 2004.
- BATISTA, A. C. O uso dos retardantes no combate aéreo aos incêndios florestais. v. 39, p. 5–10, 2009.
- BATISTA, A. C. O uso de retardantes no combate a incêndios florestais. **Flammae**, v. 4, n. 11, p. 59–75, 2018.
- BRAGA, A. **AVALIAÇÃO DE RETARDANTES DE CHAMAS EM ESCALA LABORATORIAL: Sistemas embarcados e triagem de retardantes para queimas em campo**. Monografia—[s.l.] Universidade de Brasília, 2 dez. 2022.
- BRASIL. 9.605. Lei Nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. . 12 fev. 1998.
- CAMPOS, J.; CHAVES, H. Tendências e Variabilidades nas Séries Históricas de Precipitação Mensal e Anual no Bioma Cerrado no Período 1977-2010. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 6, 25 out. 2019.
- FILHO, C. M. et al. Eficiência de um retardante de fogo de longa duração utilizado em incêndios florestais. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 2, p. 365–371, 2012.
- INPE. **Área Queimada 1 km**. Disponível em: <<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/queimadas/aq1km/>>.
- JACOBS, R. **Avaliação em laboratório da eficiência de retardantes químicos usados em incêndios florestais**. TCC—[s.l.] UFPR, 1 mar. 2021.
- LEMOS, A. et al. **Manual para Formação de Brigadista de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais**. [s.l: s.n.].
- LIMA, D. C. DE et al. EFFECTIVENESS OF WATER-RETAINING POLYMER AS FIRE RETARDANT IN INDIRECT USE. **Revista árvore**, v. 44, 2020.
- MENEGASSI, D. **Ibama revoga a compra de 10 mil litros de retardantes de chamas**. Revista virtual. Disponível em: <<https://oeco.org.br/noticias/ibama-revoga-a-compra-de-10-mil-litros-de-retardantes-de-chamas/#:~:text=O%20Ibama%20revogou%20o%20edita%20dia%207%20de%20julho>>.
- PASTOR, E. **Contribució a l'estudi dels efectes dels retardants en l'extinció d'incendis forestals**. Doutorado—Barcelona: Universidade Politècnica da Catalunya, 22 nov. 2004.
- PEREIRA, B. et al. Estudo da degradação térmica da madeira de Eucalyptus Através de termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 567–576, 7 maio 2013.

PEREIRA, J. et al. Termogravimetria: um novo enfoque para a clássica determinação de cálcio em cascas de ovos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1661–1666, 2009.

PLUCISNKI, M.; SULLIVAN, A.; HURLEY, R. A methodology for comparing the relative effectiveness of suppressant enhancers designed for the direct attack of wildfires. **Fire Safety Journal**, v. 87, p. 71–79, 2017.

SILVA, E. et al. Gastos públicos com veículos e aeronaves empregados no combate ao incêndio florestal ocorrido na Reserva Biológica de Sooretama. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1290–1308, 22 set. 2022.

SOUZA, M.; VALE, A. Levantamento de plantas de baixa inflamabilidade em áreas queimadas de Cerrado no Distrito Federal e análise das suas propriedades físicas. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 181–192, mar. 2019.

VIEIRA, F. I. et al. Combate a incêndio florestal: Determinação do Índice de Eficiência Global de retardantes químicos de curta e de longa duração e avaliação de seus efeitos sobre a redução da intensidade do fogo em vegetação, em condições de laboratório. 2011.